



Escola Politècnica Superior
d'Edificació de Barcelona

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA

INGENIERÍA TÉCNICA TOPOGRÁFICA PROYECTO FINAL DE CARRERA

IMPLEMENTACIÓN DE UNA INFRAESTRUCTURA GEOMÁTICA EN UNA MICROCUENCA INSTRUMENTADA EN LES GAVARRES

Proyectista/s: Ivan Matamoros y Ana Novella

Director/es: Carlos Gracia y Francesc Pros

Convocatoria: Junio 2011

RESUMEN

Este proyecto consiste en la implementación de un conjunto de elementos relacionados con la geomática que van a permitir georreferenciar una serie de aparatos hidrológicos en una pequeña cuenca hidrográfica, denominada cuenca de *Vernegà*. Ésta se encuentra en el municipio de Cassà de la Selva, en la comarca del Gironès, y donde además la Universitat de Barcelona realiza estudios de investigación hidrológica.

Uno de los objetivos de este proyecto va a ser la georreferenciación de los aparatos utilizados para esta investigación que están repartidos por toda la superficie de la cuenca, 2,5 Km². Para ello, previamente se ha diseñado, observado y calculado una red geodésica de precisión con receptores GNSS para poder hacer posteriormente unos levantamientos que permiten el cálculo de las coordenadas de estos aparatos. La red geodésica mencionada se ha calculado con dos programas de post-proceso distintos (Topcon Tools y Leica Geo Office), en ambos casos se han usado las señales emitidas por los satélites GPS y también la combinación de éstos con los GLONASS para poder comparar y determinar qué resultados son los más correctos.

Además, para aportar más información, se ha efectuado un plano en 3D de las dos estaciones de aforo de las que disponen, de esta manera se conocerán la geometría y dimensiones por si fuera necesario en su momento realizar algún tipo de reformas o modificaciones. También se han hecho dos campañas de un perfil de erosión materializado sobre el terreno, del cual se muestra la evolución del mismo entre un período de tiempo determinado. Por último, con cartografía del ICC se han confeccionado tres mapas temáticos de la cuenca que aportan información útil para cualquier trabajo o investigación que se quiera hacer en la zona en un futuro.

ABSTRACT

This project involves the implementation of a set of elements related to geomatics which will allow georeferencing a number of hydrological devices in a small hydrographic basin, so-called *Vernegà* basin. It is located in the municipality of *Cassà de la Selva*, in the region of *Gironès*, and where the University of Barcelona also executes hydrological research studies.

One of the aims of this project will be the georeferencing of the equipment used for research that is distributed throughout the basin area, 2.5 Km². For this, an accurate geodetic net with GNSS receivers has previously been designed, observed and calculated in order to subsequently do some surveys that make it possible to calculate the devices' coordinates. The geodetic net mentioned has been calculated with two different post-processing programs (Topcon Tools and Leica Geo Office), in both cases the signals broadcasted by the GPS satellites have been used and also the combination of these with GLONASS to compare and determine which results are the most correct.

Moreover, to contribute more information, a 3D plan of both gauging stations present has been carried out to find out the geometry and dimensions necessary to make any alterations or modifications. Also, two seasons of an erosion cross-section materialized on the ground have been done, which shows the evolution from a period of time. Finally, with the ICC cartography, three thematic maps of the basin that contribute useful information for any work or research that we want to do in the area in the future have been made.

ÍNDICE

INTRODUCCIÓN.....	9
1. Descripción del proyecto de la U.B.	11
1.1. Subcuenca de Bosc.	12
1.2. Subcuenca de Campàs.	13
1.3. Otras líneas de investigación.	15
2. Aportaciones geomáticas al proyecto de la U.B.....	17
3. Red geodésica.....	18
3.1. Sistemas de referencia.	18
3.2. Conceptos de GNSS.....	19
3.3. Red Geodésica Microcuenca Vernegà.....	20
3.3.1. Sistema geodésico y proyección.....	21
3.3.2. Diseño de la red.....	21
3.3.3. Observación de la red.....	22
3.3.4. Cálculo de la red en post-proceso.	23
3.3.5. Ajustes de la red con Leica Geo Office.	27
3.3.6. Ajustes de la red con Topcon Tools.	34
3.4. Comparación de los resultados y conclusiones.....	41
3.4.1. GPS vs GPS+GLONASS con Leica Geo Office.....	41
3.4.2. GPS vs GPS+GLONASS con Topcon Tools.....	43
3.4.3. Comparación entre programas.	45
4. Levantamientos topográficos.	50
4.1. Cierres, tolerancias y descripción de las poligonales.....	52
4.2. Cálculo y compensación de las poligonales.....	55
4.2.1. Planimetría.	56
4.2.2. Altimetría.	62
4.2.3. Coordenadas finales.....	71
4.3. Seguimiento del perfil de erosión.	73
5. Mapas temáticos.	75
6. Conclusión.	76
7. Futuras líneas de estudio.	78
8. Bibliografía.	79
9. Agradecimientos.....	81

ÍNDICE TABLAS

Tabla 1. Características del receptor GNSS.	22
Tabla 2. Offset verticales de las antenas.	24
Tabla 3. Coordenadas estación de referencia en coordenadas geodésicas (dcha.) y UTM (izq.), sistema de referencia ETRS89 / 2009.0.	24
Tabla 4. Coordenadas estación de referencia alternativa en coordenadas geodésicas (dcha.) y UTM (izq.), sistema de referencia ETRS89 / 2009.0.	24
Tabla 5. Rsiduos en las observaciones GPS y GPS+GLONASS en Leica Geo Office.	30
Tabla 6. Coordenadas, desviaciones y diferencias de las coordenadas obtenidas a partir de los dos ajustes con Leica Geo Office.	33
Tabla 7. Residuos de GPS y GPS+GLONASS con Topcon Tools.	38
Tabla 8. Coordenadas, desviaciones y diferencias de las coordenadas obtenidas a partir de los dos ajustes con Topcon Tools.	40
Tabla 9. Diferencias entre las componentes de los vectores geocéntricos con Leica Geo Office de las soluciones GPS y GPS+GLONASS.	42
Tabla 10. Diferencias entre coordenadas obtenidas del ajuste de las soluciones GPS y GPS+GLONASS con Leica Geo Office.	43
Tabla 11. Diferencias entre las componentes de los vectores geocéntricos con Topcon Tools de las soluciones GPS y GPS+GLONASS.	44
Tabla 12. Diferencias entre coordenadas obtenidas del ajuste de las soluciones GPS y GPS+GLONASS con Topcon Tools.	45
Tabla 13. Diferencia de los vectores entre LGO y TT con observables GPS.	46
Tabla 14. Diferencia de los vectores entre LGO y TT con observables GPS+GLONASS.	47
Tabla 15. Diferencias de coordenadas entre ambos programas.	48
Tabla 16. Coordenadas escogidas como más fiables.	49
Tabla 17. Características técnicas de la estación total.	51
Tabla 18. Valores T-Student.	60
Tabla 19. Resultados de fiabilidad de coordenadas con estadística T-Student.	61
Tabla 20. Valores de fiabilidad de la elipse de error para el 68% y el 95%.	61
Tabla 21. Errores de cierre en cota de cada poligonal.	62
Tabla 22. Compensación de cota por igual a todos los tramos.	63
Tabla 23. Compensación de cota proporcional a las distancias parciales.	64
Tabla 24. Sumatorio de desniveles parciales.	64
Tabla 25. Compensación de cota proporcional a los desniveles parciales.	65
Tabla 26. Compensación de cota proporcional a desniveles directo y recíproco.	66
Tabla 27. Errores del aparato.	66
Tabla 28. Errores y tolerancias de las cotas por tramos.	67

Tabla 29. Residuos del ajuste altimétrico.	68
Tabla 30. Desviaciones típicas y varianzas de las poligonales.	69
Tabla 31. Cotas y errores asociados de las bases.	70
Tabla 32. Resultados de fiabilidad de cotas con estadística T-Student.	70
Tabla 33. Comparación de las cotas por distintos métodos de cálculo.	71
Tabla 34. Coordenadas finales de las bases de las poligonales.	72
Tabla 35. Coordenadas finales de los instrumentos hidrológicos.	72

ÍNDICE IIUSTRACIONES

Ilustración 1. Emplazamiento de la zona de estudio de la UB.	11
Ilustración 2. División de la cuenca en las dos subcuencas. Verde subcuenca de Campàs y marrón la subcuenca de Bosc.....	12
Ilustración 3. Red Geodésica en la cuenca del <i>Vernegà</i>	26
Ilustración 4. Gráfica de acimuts de los satélites en una observación.	28
Ilustración 5. Parámetros generales del ajuste.....	35
Ilustración 6. Parámetros de la sigma a priori para GPS (izq.) y GPS+GLONASS (dcha.).	35
Ilustración 7. Observaciones de satélites según tiempo de observación.	36
Ilustración 8. Ejemplo de informe inmediato al ajuste (caso de GPS).....	36
Ilustración 9. Leica Flex Line TS-06.	51

ÍNDICE IMÁGENES

Imagen 1. Estación de aforo de la subcuenca de Bosc.	13
Imagen 2. Limnógrafo.	13
Imagen 3. Estación aforo de la subcuenca de Campàs (izq.) y un ISCO 3700n (drcha.).	14
Imagen 4. Estación meteorológica MeteoCat de Cassà de la Selva [UN].	15
Imagen 5. Elementos de señalización.	21
Imagen 6. Receptor Topcon Hiper Pro.	22
Imagen 7. Emplazamiento del perfil de erosión.	73

INTRODUCCIÓN

Entendemos por Geomática el conjunto disciplinario de ciencias y tecnologías que tratan del estudio, adquisición, almacenaje, organización, análisis, diseminación, gestión y explotación de la información espacial referenciada geográficamente. Las disciplinas geomáticas incluyen entre otras la cartografía, la fotogrametría, la teledetección, la calibración y orientación de sensores, la geodesia, la topografía, los sistemas de información geográfica, la ingeniería civil, la medición de deformaciones y la ingeniería geomática. Estos datos provienen de múltiples fuentes, incluyendo satélites artificiales, sensores en vehículos aerotransportados y marinos, e instrumentos de medición terrestres.

En la zona de estudio de Les Gavarres de la UB, se investigan distintos procesos hidrológicos que tienen lugar en una cuenca hidrográfica instrumentada, con el objetivo de realizar un balance hídrico y de sedimento. Estos procesos son: precipitación (cantidad e intensidad), escorrentía superficial, variaciones en los caudales, composición del agua, así como el tipo y cuantía de los sedimentos transportados. Se recogen datos desde el año 1993 con lo que se ha podido estimar el comportamiento hidrológico y ambiental de una típica zona montañosa de la costa catalana de clima mediterráneo.

Este trabajo final de carrera aporta, en el ámbito de geomática, información útil para posibles aplicaciones futuras o trabajos de investigación.

1.- Se establece una red geodésica perfectamente señalizada y calculada con la que se pueden georreferenciar otro tipo de trabajos. Además con esta red ubicamos exactamente sobre el terreno, mediante poligonales, los instrumentos fijos que el grupo utiliza.

2.- Se han realizado también dos primeras campañas de observación de un perfil de erosión, para así poder continuar la investigación del mismo en posteriores momentos.

3.- Un aporte de información sobre cartografía temática en mapas de orientaciones, de pendientes para su posible utilización para la interpretación de procesos hidrológicos.

Para la creación de una infraestructura geomática los instrumentos más utilizados son los receptores GNSS (Global Navigation Satellite Systems), que actualmente incluye el sistema norte americano GPS (Global Position System) y el ruso GLONASS (Global Orbiting Navigation Satellite System), próximamente entrará en funcionamiento el sistema europeo GALILEO y el chino BEIDOU.

Hoy en día, en los trabajos topográficos o geomáticos predominan las observaciones GNSS ante los métodos clásicos topográficos puesto que el rendimiento de los receptores es mucho más eficiente, siempre teniendo en cuenta que nuestra zona de estudio es muy extensa y hay suficiente cielo despejado para utilizar este tipo de instrumentación.

El uso de la estación total sigue siendo imprescindible para trabajos de alta precisión. Para ello, en nuestro trabajo, se han realizado poligonales para poder georreferenciar determinados puntos de interés hidrológico de la zona de estudio.

Este proyecto se realiza con el objeto de obtener coordenadas de alta precisión tanto planimétricas como altimétricas de los instrumentos hidrológicos repartidos por la cuenca para el estudio hidrográfico de la misma. Para ello ha sido necesaria la realización de una red geodésica por técnicas espaciales, además de unas poligonales por métodos clásicos para georreferenciar dicha instrumentación.

Además tendremos como objetivo la realización de comparativas entre software de cálculo de post-proceso y de los resultados obtenidos del ajuste de la red mediante el cálculo de vectores con señal GPS y GPS+GLONASS.

1. Descripción del proyecto de la U.B.

En el proyecto de la U.B. se realizan trabajos de investigación hidrológica para una cuenca típicamente mediterránea, ésta se encuentra al sur oeste del macizo de Les Gavarres, en el municipio de Cassà de la Selva, cuenca de primer orden según Strahler, puesto que a la riera de *Vernegà* no le llega ningún otro curso fluvial, formando parte de la cuenca del Ter.

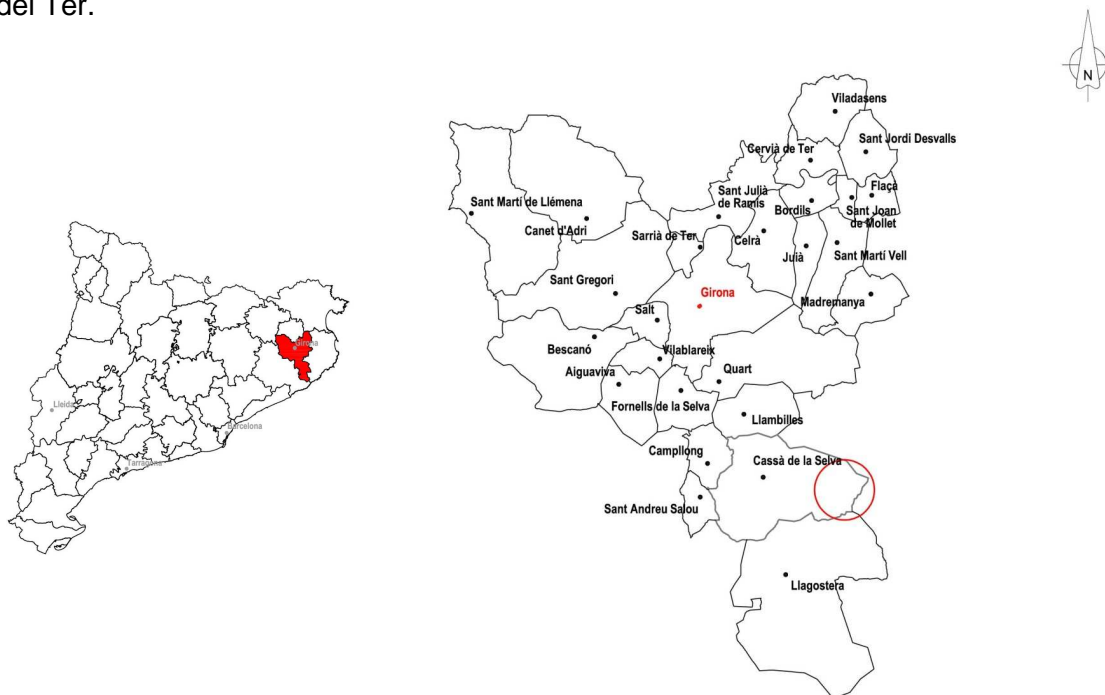


Ilustración 1. Emplazamiento de la zona de estudio de la UB.

El objetivo de estudio es el mantenimiento, seguimiento y análisis de los procesos hidrológicos y de erosión de los eventos en una cuenca con 19 años de datos y con diferentes instrumentos instalados para su control: estación de aforo¹, estación meteorológica, evaporímetros², pozos y pluviómetros³, estos últimos distribuidos por toda la cuenca porque existen diferentes variaciones de precipitación entre un extremo y otro. Esta cuenca representativa tiene 2,5 km², en su mayoría cubierta por alcornoques en su parte más alta y por cultivos tradicionales en la llanura. El estudio se basa en instrumentación y monitorización de dos pequeñas cuencas integradas, *Bosc* y *Campàs*, la primera totalmente forestada y la segunda incluyendo campos de cultivo. (Ilustración 2).

¹ Instalación situada en un punto de una corriente de agua y dotada de los dispositivos adecuados para medir su caudal y nivel.

² Sistema que permite conocer la cantidad de agua que se evapora mediante la diferencia de lecturas del grosor de la lámina de agua.

³ Instrumento meteorológico empleado para medir la cantidad de lluvia caída.

Además se hacen estudios de las aguas subterráneas que permiten determinar cuál es el almacén de agua que tiene la cuenca. La medida del nivel freático se realiza mediante una sonda de pozos o sonda piezométrica⁴ atada a una cinta métrica. También es importante medir la humedad del suelo para determinar la facilidad que tiene de saturación y la velocidad en generar escorrentía⁵, se realiza mediante el TDR que permite medir el grado de humedad que hay en el suelo.

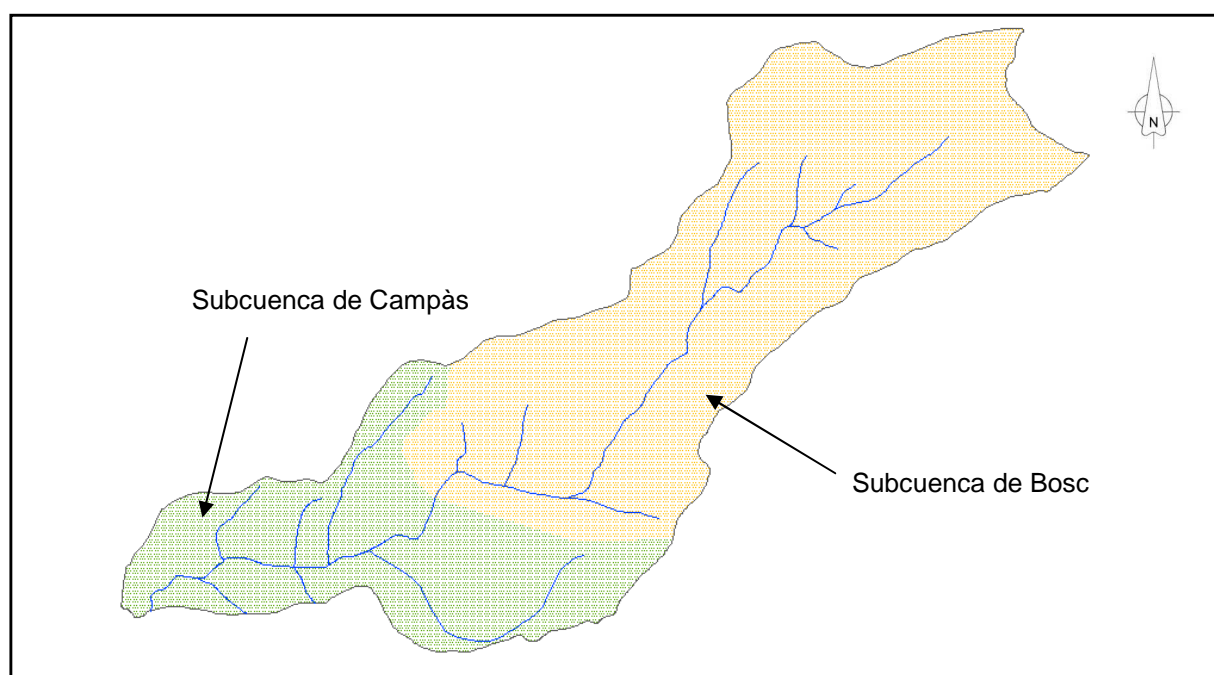


Ilustración 2. División de la cuenca en las dos subcuencas. Verde subcuenca de Campàs y marrón la subcuenca de Bosc.

1.1. Subcuenca de Bosc.

Se encuentra en una zona donde las altitudes van de 190 a 440 m sobre el nivel del mar. Dispone de una estación de aforo de sección combinada rectangular y en forma de V de 45° de apertura. Con una capacidad máxima de 0,059 m³ por segundo (Imagen 1). En esta estación hay instalado un limnógrafo⁶ del tipo OTT y un muestreador de agua que permite conocer los parámetros básicos de calidad del agua como son: temperatura, conductividad, pH y el oxígeno disuelto. Los controles de éstos se llevan a cabo cada 15 días y los del muestreador de agua y sedimento después de las crecidas. Además hay tres pluviómetros repartidos por esta subcuenca para la medición de la precipitación.

⁴ Instrumento que mide el nivel de agua en la capa freática.

⁵ Agua de lluvia que discurre por la superficie de un terreno según sea la morfología y composición del mismo.

⁶ Aparato empleado para registrar las variaciones de altura del nivel de agua de un pozo, lago, río, etc.



Imagen 1. Estación de aforo de la subcuenca de Bosc.



Imagen 2. Limnógrafo.

1.2. Subcuenca de Campàs.

Esta subcuenca tiene una 10% de superficie agrícola, se encuentra en altitudes que van de 150 a 440 m sobre el nivel del mar. Dispone de una estación de aforo de una sección combinada rectangular y triangular, puede desalojar un caudal máximo de $3,5 \text{ m}^3$ por segundo. Los niveles de agua se registran de la misma manera que la estación de aforo de Bosc y las muestras de agua se toman automáticamente con un ISCO 3700 programado para muestrear cada dos horas durante episodios de crecida, cuando el caudal alcanza los $0,6 \text{ l/s}$.



Imagen 3. Estación aforo de la subcuenca de Campàs (izq.) y un ISCO 3700 (drcha.).

Además en la subcuenca Campàs hay una estación meteorológica que forma parte de *Xarxa d'Estacions Meteorològiques Automàtiques* (XEMA) del *Servei de Meteorologia de Catalunya*. Ésta incluye sensores para medir la precipitación (pluviógrafo), la humedad relativa, la temperatura del aire, la radiación neta y global, la velocidad y dirección del viento. Los sensores están conectados a un registro continuo de datos que mide las variables cada 10 minutos. Además se hallan otros dos pluviómetros repartidos por la superficie de la misma subcuenca. Cerca de esta estación se encuentra un pluviómetro totalizador⁷.

⁷ Un pluviómetro totalizador es un aparato capaz de almacenar la precipitación durante un cierto tiempo. Éste al contrario que los pluviómetros convencionales evitan la evaporación del agua precipitada.



Imagen 4. Estación meteorológica MeteoCat de Cassà de la Selva [UN].

1.3. Otras líneas de investigación.

Además del proyecto de la UB en la cuenca existen proyectos de estudio por parte de la división de los bomberos de Cataluña (GRAF) y otro iniciado recientemente por el *Institut Català del Suro*.

El *Grup de Reforç d'Actuacions Forestals* (GRAF) se encarga de realizar incendios controlados en la zona para posteriormente investigar el comportamiento de dicho fuego según la vegetación y el relieve del terreno. Los efectos de los fuegos controlados se deben estudiar, especialmente las propiedades de las cenizas, porque estas son nutrientes importantes para la recuperación del ecosistema. El objetivo de este estudio es determinar los efectos de un pequeño fuego controlado y los elementos de la ceniza que se disuelven con el agua incluyendo el pH, la conductividad eléctrica, calcio, magnesio, sodio, potasio, etc. La aplicación de este fuego intencionado mejorará el estado de los nutrientes del suelo sin causar degradación y por lo tanto es considerado una buena estrategia de gestión.

Para evitar incendios virulentos y sus efectos en las propiedades humanas y ecosistemas, la aplicación de fuegos intencionados puede reducir la biomasa y el riesgo de fuegos muy intensos, es una opción poco costosa y eficiente para la gestión del bosque. Estos fuegos controlados son normalmente de baja intensidad y consumen el sotobosque y parte de las capas del suelo del bosque, pero no daña los árboles.

Por otro lado el *Institut Català del Suro* inauguró el 17 de Mayo una nueva sede forestal en la finca Mas Bassets, ubicada en la cuenca de estudio. El hecho de disponer de una finca forestal hará avanzar al Instituto en la línea de trabajo empezada en los últimos años con

diversos organismos e instituciones forestales. La finca forestal, que consta de 5 ha. y está situada en medio del patrimonio de Les Gavarres, será usada por el Instituto con el fin de realizar pruebas y estudios que puedan mejorar la calidad del corcho, hacer demostraciones de la práctica de extracción, así como realizar visitas guiadas.

2. Aportaciones geomáticas al proyecto de la U.B.

A partir de este proyecto final de carrera se le ofrecerán múltiples recursos geomáticos a las investigaciones actuales sobre geografía física que está realizando la Universidad de Barcelona en la pequeña cuenca hidrográfica de *Vernegà*.

Hasta ahora se disponían de instrumentos y sensores para la medición de los efectos medioambientales y meteorológicos, pero éstos estaban colocados de forma que no se conocían sus posiciones exactas y por tanto no existía relación geométrica alguna entre ellos. El principal objetivo es ubicar con precisión estos instrumentos para posibles modificaciones de los mismos o colocación de algún otro tipo de aparato en relación a éstos. Además de aquellos instrumentos que estén sobre una estructura se realiza una definición geométrica en 3D, con el programa SolidWorks, para conocer sobre plano las medidas de las mismas y poder estudiar posibles remodelaciones.

Para conseguir esto se ha tenido que instaurar una red geodésica de alta precisión a lo largo de la microcuenca. Los vértices de esta red, un total de 12, están señalizados con hitos sobre el terreno, lo que les garantiza una larga durabilidad para posibles trabajos futuros.

Otra aportación al proyecto de investigación de la U.B. es la materialización de un perfil de erosión sobre el terreno y la toma de datos de dos campañas distintas y el estudio de la variación de cota y por tanto la erosión y la sedimentación que se ha producido en él.

Por último a partir de la cartografía obtenida del ICC se realizan distintos mapas temáticos con el programa de modelado Inroads para ofrecer información adicional a la investigación de la zona, como son un mapa de orientación de pendientes, mapa de elevaciones definida por colores y un mapa de pendientes.

3. Red geodésica.

Las redes geodésicas, son imprescindibles para el estudio teórico de la forma y figura de la Tierra, objetivo principal de la Geodesia, así como para el planteamiento, diseño y ejecución de cualquier tipo de infraestructuras. Están constituidas por puntos de clara estabilidad sobre el terreno mediante señalización adecuada entre los que se han llevado a cabo observaciones geodésicas para la obtención de sus coordenadas, habiéndose fijado de anteriormente, en términos relativos y absolutos su precisión y fiabilidad respecto un sistema de referencia preestablecido.

La red geodésica española, actualmente está formada por cadenas de triángulos, que cubren todo el territorio español entendiéndose por red geodésica a la planimétrica, y a la altimétrica como red de nivelación.

3.1. Sistemas de referencia.

- **ED50.**

El sistema de referencia geodésico ED50 (European Datum 1950) fue creado en el transcurso de la segunda guerra mundial, en la cual fue necesario conectar internacionalmente las diferentes redes geodésicas europeas. Este hecho llevó al departamento de defensa de los EE.UU. a establecer el ED50 como un datum único para realizar la cartografía de toda Europa occidental.

Está basado en el elipsoide Internacional de 1924, Hayford. Los puntos que materializaban el sistema de referencia ED50 obtuvieron en aquellos momentos una exactitud continental que oscilaba entre unos pocos metros en el centro de Europa y más de diez metros en el extremo sur. La utilización de este sistema puede provocar grandes incoherencias entre elementos del territorio, que son inevitables si se tiene en cuenta la falta de precisión del propio sistema de referencia utilizado.

Por otro lado, las mejoras en los sistemas de observación hacen que sea posible medir magnitudes que están por encima de la propia precisión del sistema de referencia. Estos hechos son los que fomentaron la necesidad de definir un nuevo sistema de referencia de mayor precisión.

En el sistema ED50 no se podrá inscribir a los registros cartográficos ningún proyecto nuevo desde 01/01/2012, mientras que los demás proyectos tendrán una fecha límite del 01/01/2015.

- **ETRS89.**

Es un sistema geodésico de referencia tridimensional empleado como un estándar para la georreferenciación de alta precisión en Europa. Está basado en el elipsoide GRS80, difiere ligeramente del elipsoide que emplea el sistema WGS84 actualmente. Es un sistema de referencia ligado a la parte estable de la placa europea y se mueve solidariamente a la placa tectónica Euroasiática.

Este sistema se hace oficial mediante el Real Decreto 1071/2007 del 29/08/2007. A partir del 01/01/2015 las publicaciones serán exclusivamente en el nuevo sistema de referencia ETRS89.

- **Cambio de sistema de referencia.**

Debido a las implicaciones que comporta un cambio de sistema de referencia, el Consejo Superior Geográfico creó una comisión temporal bajo el nombre de Comisión de transición a ETRS89, con el objetivo que estudiase el impacto y la mejor forma de abordar el cambio de sistema de referencia.

El marco de referencia oficial es la red REGENTE (REd GEodésica Nacional por Técnicas Espaciales), que es la densificación de la campaña Iberia 95 mediante GPS. El conjunto de la red REGENTE y las coordenadas de la ROI en ETRS89 forman un marco homogéneamente distribuido en Cataluña de unos 700 puntos densificados por el ICC con la llamada Xarxa Utilitària Geodèsica (X.U.G) que consta de un total de 3673 vértices.

Dicho esto, en este proyecto se va a utilizar el sistema de referencia ETRS89 porque va a ser el oficial de aquí en adelante para todas las publicaciones. Para la información cartográfica que obtenemos del ICC y que están publicadas en ED50 se realiza un cambio de sistema de referencia mediante los parámetros de transformación.

3.2. Conceptos de GNSS.

Para la implementación de una red geodésica en la zona de estudio de la U.B. se han tenido en cuenta algunos aspectos GNSS, y así realizar las observaciones de manera correcta y adecuada.

Bajo el sistema GNSS (Global Navigation Satellite Systems) se engloban todas las técnicas de posicionamiento mediante satélites, la más conocida de ellas es el GPS (Global Positioning System) pero hoy en día existen otras constelaciones disponibles como GLONASS y próximamente GALILEO y BEIDOU.

GPS es un sistema de navegación por satélite que provee a usuarios de coordenadas precisas de posicionamiento tridimensional e información sobre navegación y tiempo. Se empezó a desarrollar en 1973 con un uso militar en principio, aunque también se está utilizando desde entonces para usos civiles pero con ciertas restricciones, siendo utilizado para fines geodésicos prácticamente desde 1983. La operatividad completa del sistema fue alcanzada en 1994, con 24 satélites disponibles, aunque en la actualidad cuenta con 31 orbitando.

El sistema GLONASS (Global Orbiting Navigation Satellite System) está administrado por las Fuerzas Espaciales Rusas, consta de 24 satélites con total disponibilidad, situados en 3 órbitas de 64.8° de inclinación a 19100 km de altitud.

Aunque GPS y GLONASS son sistemas diferentes tiene posibilidad de uso combinado. Los problemas que surgen de esta combinación son los diferentes Sistema de Tiempo (Tiempo GPS y GLONASS) y los diferentes Sistemas de Referencias WGS84 y PZ-90, teniendo como solución, pasar todos los satélites a WGS84.

Las ventajas de trabajar con la combinación de ambos sistemas es el mayor número de satélites donde en zonas de poca visibilidad se tiene más probabilidad de captar satélites y mayor confianza en los datos calculados para un mismo tiempo de observación.

Para realizar la red geodésica se emplea este método de observación para el posterior cálculo de los vectores. Se observó con el receptor Topcon Hiper Pro que es capaz de recibir la señal tanto de los satélites GPS como de GLONASS a pesar de las dificultades que conlleva por las distintas frecuencias de emisión. Posteriormente se han procesado los vectores tanto en GPS como la combinación de ambos para comparar si realmente vale la pena o no estar trabajando con las dos constelaciones, se obtendrán conclusiones al respecto al finalizar el ajuste de la red por todos los métodos.

3.3. Red Geodésica Microcuenca Vernegà.

Las prescripciones técnicas de observación son las siguientes:

3.3.1. Sistema geodésico y proyección.

Se adopta el sistema de referencia ETRS89 de acuerdo con la Publicación del Real Decreto 1071/2007, que regula el cambio de sistema de ED50 a ETRS89. El elipsoide de referencia es el GRS80 y para la transformación de cota elipsoidal a ortométrica se ha empleado una utilidad distribuida por el ICC que utiliza el nuevo modelo de geoide EGM08D595.

En cuanto al sistema de proyección, se usa UTM (Universal Transversal Mercator) en el huso 31 norte.

El conjunto de observaciones de la red, está georreferenciada por una estación permanente de la red del ICC (Institut Cartogràfic de Catalunya), en este caso es se decidió que fuese la de Cassà de la Selva por ser la más cercana.

3.3.2. Diseño de la red.

En el proyecto se han implantado un total de 12 vértices, 10 de ellos materializados mediante hitos de resina de color amarillo (95x95x60) con un vástago de 40 cm, los otros dos puntos están materializados con clavos para hormigón establecidos sobre un elemento estable o roca.



Imagen 5. Elementos de señalización.

En cuanto al diseño de la red se tuvo en cuenta:

- a) Sobre cartografía 1/5000 del ICC se localizaron los posibles emplazamientos de los vértices. Una vez elegido el emplazamiento, en campo se realizan las comprobaciones del estado de cada uno de los lugares escogidos (accesos, horizonte, vegetación, visibilidad, etc.), en caso de duda se estudiaron zonas cercanas para un posible traslado.

- b) La distancia media entre vértices va desde los 300 a los 2500 metros, con un total de 30 observaciones, algunas de mayor distancia para unir los extremos de nuestra red y poder georreferenciar con la estación permanente más cercana (*Cassà de la Selva* con un vector de 1,5 km y otro de 3,3 km aproximadamente).
- c) La red cubre todo el territorio, excepto localizaciones de difícil acceso.
- d) Los vértices tienen horizonte despejado por encima de 15° de elevación evitando la cobertura de la vegetación.
- e) Las señales son accesibles a través de caminos rurales, necesitando un vehículo todo terreno para los vértices situados en la subcuenca de Bosc.

3.3.3. Observación de la red.

Las observaciones se llevaron a cabo los días 23, 24, 25 de Octubre y las observaciones de radiación el 11 de Noviembre del 2010. La observación de la red se llevó a cabo con dos receptores del modelo Topcon Hiper-PRO (características en Tabla 1).

El método empleado de posicionamiento fue estático, con una máscara de elevación de 15° e intervalos de registro de 15 segundos. Cada vector se observó un mínimo de 30 minutos por estacionamiento, excepto en zonas con mal horizonte que se estuvo una media de 45 minutos, como fue el vértice que nosotros nombramos como F, para garantizar una buena precisión con una configuración de satélites adecuada. Para los puntos radiados con GPS que después pertenecerán a las poligonales, se estuvo observando durante unos 45 minutos por vector.

Topcon Hiper Pro	
Tecnología	Sistema Co-Op Tracking Topcon.
Tipo señal	GPS + GLONASS y portadora de EGNOS y WASS.
Canales	40 repartidos entre L1/L2, C/A y código P.
Precisiones:	
Estático	Horizontal: $\pm(3 \text{ mm} + 0,5 \text{ ppm})$ Vertical: $\pm(5 \text{ mm} + 0,5 \text{ ppm})$
Cinemático	Horizontal: $\pm(10 \text{ mm} + 1 \text{ ppm})$ Vertical: $\pm(15 \text{ mm} + 1 \text{ ppm})$



Fuente: www.inlandgeo.es

Tabla 1. Características del receptor GNSS.

Imagen 6. Receptor Topcon Hiper Pro.

Para tener una buena fiabilidad de la red, se han seguido unos criterios en el diseño y observación de ésta:

- En cada uno de los vértices concurren un mínimo de tres vectores. Y así poder identificar si existen errores en las observaciones de uno de los vectores.
- Se ha estacionado al menos en dos ocasiones en cada vértice, si ha sido posible en distintos días para así poder evitar errores groseros en el estacionamiento.
- Al trabajar con dos receptores todos los vectores son linealmente independientes.
- Se toma la altura de antena al iniciar y al finalizar cada una de las observaciones para comprobar que ha sido bien tomada.

Con esto se consigue disminuir los errores groseros y accidentales en la toma de datos de las observaciones, dando mayor fiabilidad a los resultados.

3.3.4. Cálculo de la red en post-proceso.

Para el cálculo de nuestra red se han utilizado los programas Leica Geo Office v.5.0 y Topcon Tools v.7.5 con la finalidad de poder comparar los resultados finales y determinar la mejor solución según sus respectivos métodos de cálculo.

Realizadas las observaciones en campo se descargan los datos en el programa Topcon Tools ya que los receptores son del mismo fabricante y no se pueden descargar en otro. Estos datos para poder ser introducidos en el programa Leica Geo Office se tendrán que transformar en archivos Rinex⁸, y así poder empezar a trabajar con ellos.

Los pasos generales han sido:

- Se importan los archivos Rinex a los dos programas, también los datos de la estación de referencia, Cassà de la Selva.
- En el programa Leica Geo Office no se detecta el modelo de antena y por ello debemos cambiar los *offset* de las frecuencias L1 y L2, la antena de Cassà de la Selva buscamos sus datos en *logfile* (véase anejos página 4) del ICC, mientras que los *offset* de la antena Hiper Pro lo consultamos en la página web NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration).

⁸ El formato RINEX satisface esta necesidad de intercambio de información registrada por diferentes receptores, que organizan sus datos en diferentes formatos de ficheros binarios, entre distintos programas.

Modelo de antena	L1	L2
TPSHIPER_PRO	0,1059 m	0,0971 m
TRM29659.00 (CASS)	0,11 m	0,128 m
TRM41249.00 (SBAR)	0,0714 m	0,0682 m

Tabla 2. Offsets verticales de las antenas.

- Pondremos como vértice de control, es decir, al cual se georreferencia toda nuestra red, la estación de Cassà de la Selva, con las últimas coordenadas publicadas en el ICC. La estación de CASS se encuentra a una distancia media de unos 2 km de nuestra red.

Nombre	CASS		
Código	307102001		
Latitud	41° 52' 58.37998" N	X UTM	492048.909
Longitud	2° 54' 15.00586" E	Y UTM	4636777.467
Altura elipsoidal	251.787 m		

Tabla 3. Coordenadas estación de referencia en coordenadas geodésicas (dcha.) y UTM (izq.), sistema de referencia ETRS89 / 2009.0.

Como comprobación de posibles errores groseros en la georreferenciación (altura de antena, coordenadas de la estación de referencia mal introducidas, etc.), calculamos las coordenadas de los vértices J y A desde otra estación de referencia, San Bartolomeu de Grau situada a una distancia media de unos 63 km.

Nombre	SBAR		
Código	289097001		
Latitud	41° 58' 48.38862" N	X UTM	431595.373
Longitud	2° 10' 27.45525" E	Y UTM	4647897.336
Altura elipsoidal	937.890 m		

Tabla 4. Coordenadas estación de referencia alternativa en coordenadas geodésicas (dcha.) y UTM (izq.), sistema de referencia ETRS89 / 2009.0.

- Para tener la certeza de que en el cálculo de los vectores vamos a tener resolución de las ambigüedades hacemos una limpieza en las observaciones de cada estacionamiento a los satélites para evitar cortes de recepción de datos.

- Cálculo de los vectores entre vértices. En el caso de Leica Geo Office se calculan primero los vectores que se enlazan con la estación de referencia de Cassà, es decir CASS-A y CASS-J. Seguidamente se procede al cálculo del resto de los vectores escogiendo uno de los vértices como referencia y el otro móvil exceptuando A y J que serán siempre de referencia por estar enlazados anteriormente con la estación de Cassà.

Topcon Tools te indica los vectores posibles de calcular, de los cuales se escogen los mismos que con el otro programa para su posterior comparación. En este programa no es necesario indicar que vértice es de referencia y cuál es el móvil, sino que se seleccionan los deseados.

- Resueltas las ambigüedades de todos los vectores generados se procede al ajuste de la red.

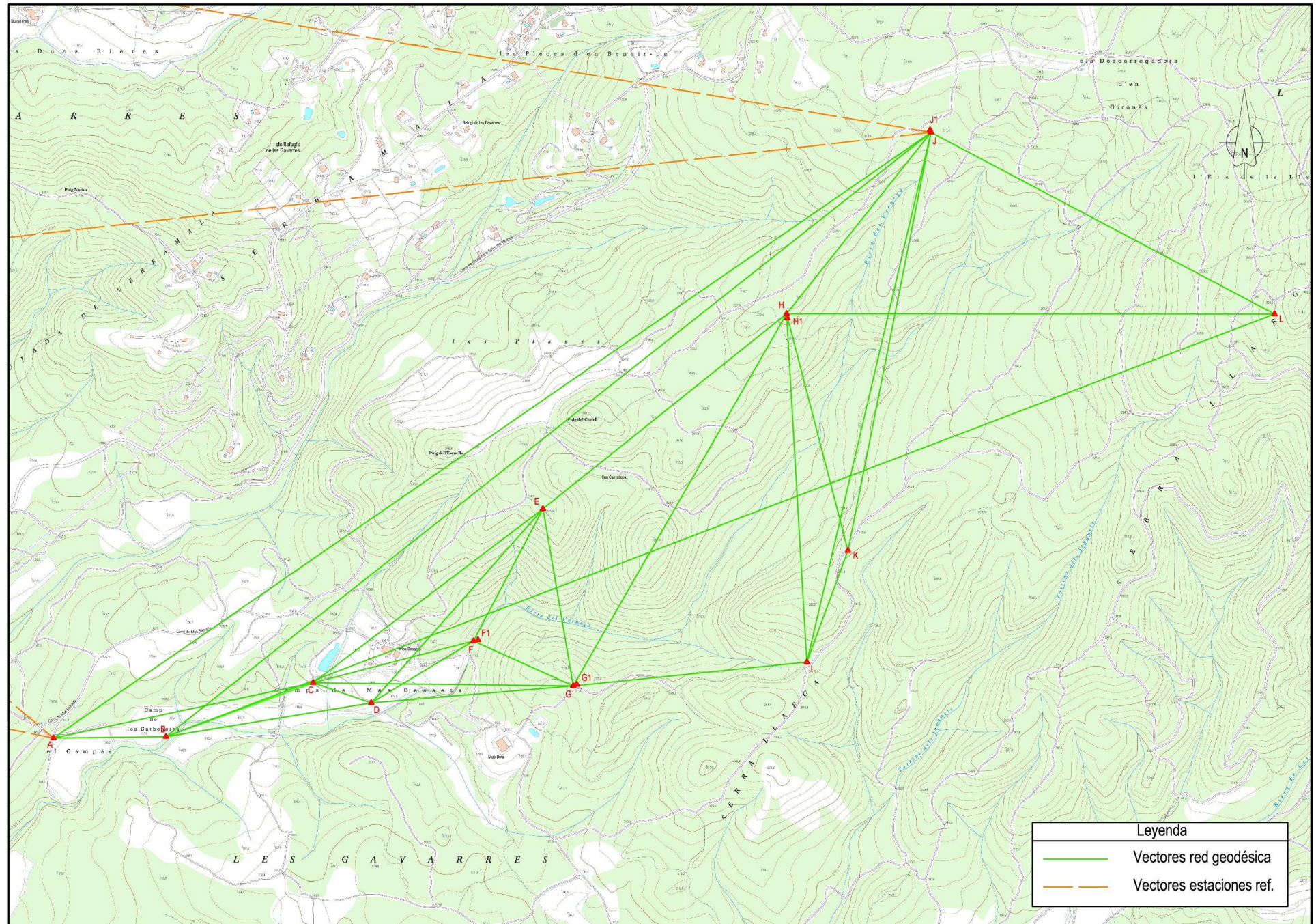


Ilustración 3. Red Geodésica en la cuenca del Vernegà.

3.3.5. Ajustes de la red con Leica Geo Office.

Para el ajuste de la red se han utilizado dos programas de análisis de datos en post proceso, con observaciones GPS y GPS+GLONASS, en este apartado se explica el programa Leica Geo Office.

Al empezar a hacer el ajuste de la red, se ha de tener en cuenta los parámetros estadísticos para llevarlo a cabo, puesto que serán los que nos indiquen la bondad de los vectores y si hay o no alguno de ellos rechazado. Los parámetros son los siguientes:

- Alpha: Es la probabilidad de rechazar una buena observación.
- Beta: Se puede definir como la fortaleza de la prueba o la probabilidad de aceptar una mala observación.
- Sigma a priori: Este valor se emplea para compensar las observaciones GPS demasiado optimistas.

Al finalizar los ajustes en ambos programas se muestra un informe donde se analizan las observaciones mediante análisis estadísticos, que son los siguientes:

- Prueba F: es empleada comúnmente en pruebas multidimensionales para revisar las hipótesis nulas. Se le conoce también como la prueba del modelo completo, ya que lo analiza en forma general.
- Prueba W: La prueba se basa en el supuesto de que la variable es normal tipificada. Por tanto, fijando un nivel de significación α , se trata de comprobar si el valor que toma la estadística, para cada observación, cae dentro del correspondiente intervalo de aceptación.
- Prueba T: La prueba se basa en el supuesto de que la variable aleatoria sigue una distribución T con n-h que son los grados de libertad. El tamaño de los residuos, también puede sugerir errores groseros en las correspondientes observaciones, pero no los identifica necesariamente. Un error grosero en una observación puede afectar los residuos de las restantes observaciones.

El procedimiento que debemos seguir en la detección de errores groseros en las observaciones basada en las anteriores pruebas consta de los siguientes pasos:

- Localizar todos los residuos que no pasen la prueba.
- Recalcular y/o eliminar la observación correspondiente al residuo mayor.
- Recalcular la red.
- Repetir el proceso anterior hasta que los residuos pasen las pruebas

Este programa, Leica Geo Office, se basa en un ajuste mediante el método de mínimos cuadrados, con un software desarrollado por la escuela de geodésia de la “T.U. Delft” llamado Move3 V3.4.

Los valores para los criterios de las pruebas estadísticas tanto para el ajuste con GPS como para la combinación de este con GLONASS han sido de 0,1 para el Alpha, 80 para el valor de Beta y en cuanto a la sigma a priori se ha optado por colocar un valor de 35 para ambos casos.

Para realizar el ajuste de la red con Leica Geo Office se ha decidido operar con las desviaciones estándar asociadas al cálculo de los vectores.

Tras realizar el ajuste de la red, en ambos cálculos se detectan errores en las observaciones gracias al informe que nos ofrece los residuos y resultados de las pruebas. Para intentar reducir estos errores se han analizado cada una de las líneas base que tenían los residuos más elevados. Para ello se ha utilizado la opción de analizar cada uno de los vectores donde se muestran las características de los satélites (GDOP, acimut y elevación), donde se ve más claro cuáles son los posibles satélites que hacen aumentar los residuos de la observación, es el análisis de los DOPs, las elevaciones y el acimut de cada satélite.

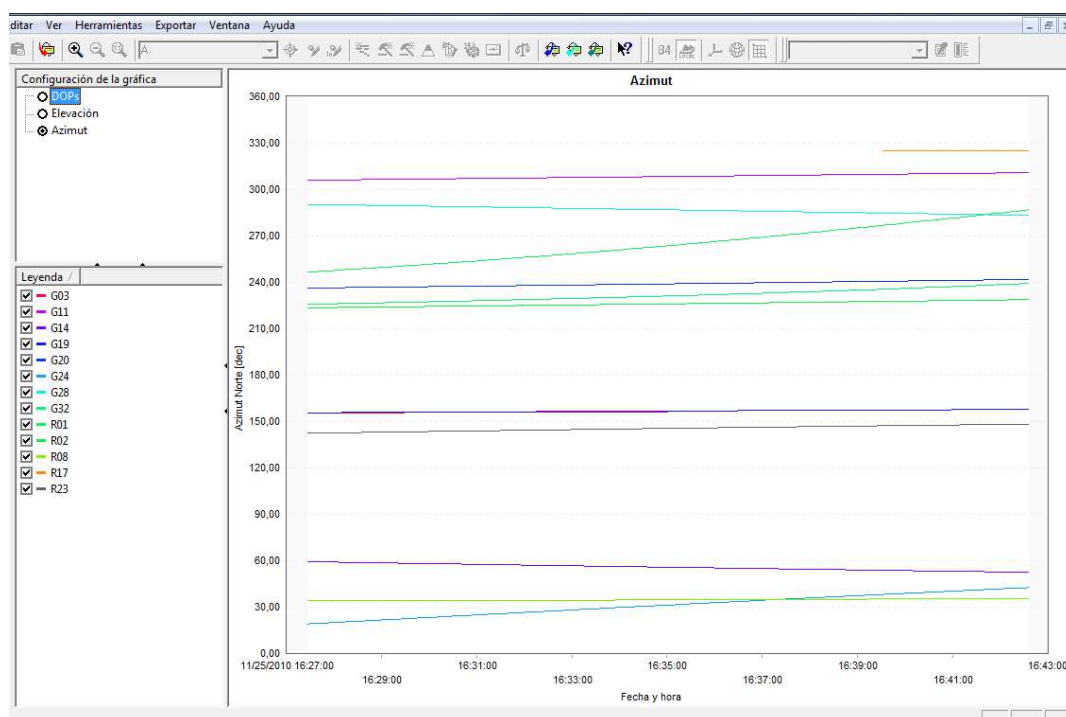


Ilustración 4. Gráfica de acimuts de los satélites en una observación.

En ocasiones puede que uno de los satélites de la observación tenga un acimut no constante, con lo que se desprecia y así mejorar los resultados de las estadísticas. También se ha variado ligeramente la máscara de elevación por debido a la densa forestación en algunos vértices. Si los resultados no mejoran se desprecia el vector, cerciorándose que sigan concurriendo tres vectores a cada vértice.

En nuestro caso se ha decidido eliminar el vector EC, por no entrar en tolerancia y no pasar las pruebas estadísticas.

Una vez arregladas las observaciones todo lo posible para minimizar los residuos, se ha hecho el ajuste definitivo, obteniendo en el informe los siguientes resultados estadísticos:

Observaciones	Pruebas
Diferencias de coordenadas GPS: 99 (33 líneas base)	Alfa (multi dimensional): 0.3059
Coordenadas conocidas: 3	Alfa 0 (una dimensión): 0.1 %
Total: 102	Beta: 80.0 %
Incógnitas	Sigma a-priori (GPS): 35.0
Coordenadas: 39	Valor crítico de Prueba W: 3.29
Total: 39	Valor crítico de la prueba T (2 dimensiones): 5.91
Grados de libertad: 63	Valor crítico de la prueba T (3 dimensiones): 4.24
	Valor crítico de prueba F: 1.08
	Prueba F: 0.87 (aceptado)

Fuente: Datos obtenidos del informe del programa Geo Office con GPS.

Observaciones	Pruebas
Diferencias de coordenadas GPS: 99 (33 líneas base)	Alfa (multi dimensional): 0.3151
Coordenadas conocidas: 3	Alfa 0 (una dimensión): 0.1 %
Total: 102	Beta: 80.0 %
Incógnitas	Sigma a-priori (GPS): 35.0
Coordenadas: 39	Valor crítico de Prueba W: 3.29
Total: 39	Valor crítico de la prueba T (2 dimensiones): 5.91
Grados de libertad: 63	Valor crítico de la prueba T (3 dimensiones): 4.24
	Valor crítico de prueba F: 1.08
	Prueba F: 0.71 (aceptado)

Fuente: Datos obtenidos del informe del programa Geo Office con GPS+GLONASS.

En el informe, en el apartado de observaciones y residuales, se muestran las observaciones ajustadas. También indica el valor de la observación ajustada (Obs. ajus.), el valor sin ajustar menos el valor ajustado (Res), el residuo en Este, Norte y Altura (Res. (ENA)) y la desviación estándar del valor ajustado (Desv. Est.). En estos ajustes los residuos para cada observación han sido los siguientes (donde el color rojo son para aquellos valores superiores a 2 cm y el amarillo para valores mayores a 1 cm):

	Leica Geo Office					
	Residuos GPS			Residuos GPS+GLONASS		
	ΔE	ΔN	ΔA	ΔE	ΔN	ΔA
L H	-0,0035	0,0013	-0,0016	-0,0009	0,0051	-0,0017
L B	0,0025	0,0040	-0,0006	-0,0014	-0,0052	0,0061
J L	0,0010	0,0045	-0,0051	-0,0010	0,0012	0,0014
J K	0,0046	0,0078	-0,0210	0,0026	0,0075	-0,0031
J I	-0,0052	-0,0037	-0,0060	-0,0011	0,0003	-0,0016
J H	-0,0017	0,0006	0,0001	0,0017	0,0037	0,0070
J B	-0,0012	-0,0047	0,0086	-0,0042	0,0061	-0,0055
J A	0,0013	-0,0029	0,0113	0,0009	0,0010	-0,0045
I K	0,0011	-0,0055	0,0128	0,0010	-0,0037	0,0047
I G	-0,0009	0,0010	0,0092	0,0149	0,0033	-0,0278
H K	-0,0003	0,0013	0,0046	0,0011	0,0024	0,0058
H I	0,0011	-0,0012	0,0025	0,0017	-0,0001	-0,0018
H E	-0,0034	0,0031	-0,0104	-0,0095	0,0013	-0,0134
G H	-0,0018	0,0003	0,0034	0,0004	0,0005	-0,0032
G F	-0,0123	0,0074	0,0003	-0,0105	0,0128	0,0079
G E	0,0059	-0,0029	0,0098	0,0038	0,0019	0,0036
G D	0,0033	-0,0071	-0,0001	0,0039	-0,0049	0,0114
G C	-0,0019	0,0023	-0,0074	-0,0015	0,0007	-0,0046
F E	0,0031	0,0002	-0,0042	0,0039	-0,0026	0,0059
F D	-0,0036	-0,0030	-0,0029	-0,0025	-0,0042	-0,0001
F C	-0,0039	0,0094	0,0093	-0,0025	0,0092	-0,0026
E D	-0,0008	0,0014	-0,0009	0,0074	0,0097	0,0032
D B	-0,0003	-0,0014	-0,0034	0,0011	-0,0015	-0,0006
C D	0,0037	-0,0048	-0,0068	0,0000	-0,0010	-0,0058
B C	0,0008	-0,0005	-0,0008	0,0030	-0,0045	0,0020
A C	-0,0001	-0,0017	0,0048	0,0078	-0,0113	-0,0106
A B	0,0035	0,0037	-0,0084	0,0004	0,0000	0,0006
CASS J	-0,0003	-0,0004	0,0047	0,0032	0,0009	0,0009
CASS J	-0,0048	-0,0026	0,0087	-0,0047	0,0020	-0,0010
CASS J	0,0017	0,0011	0,0067	0,0005	0,0043	-0,0045
CASS A	-0,0026	-0,0095	0,0054	-0,0039	-0,0121	0,0107
CASS A	-0,0005	0,0010	-0,0059	-0,0014	-0,0017	-0,0005
CASS A	0,0019	0,0087	-0,0038	0,0007	0,0060	0,0016

Tabla 5. Rsiduos en las observaciones GPS y GPS+GLONASS en Leica Geo Office.

Podemos observar que entre los valores mínimos y máximos existe una diferencia de 1 cm aproximadamente en las coordenadas Este y en las Norte, mientras que en las coordenadas de Altura la diferencia es de unos 2 cm en GPS y unos 3 cm en GPS+GLONASS. Esto es un resultado coherente puesto que en Altura la precisión es inferior.

A continuación se muestran las pruebas estadísticas mencionadas en el apartado 3.3.5., además de las pruebas de fiabilidad interna (Sesgo Mínimo Detectable, MDB) y externa (Relación Señal-Ruido, BNR) de la red, que son:

- MDB*: presenta el tamaño del error mínimo posible de observación, detectable por la prueba estadística con una probabilidad igual al valor β de la prueba. Un valor MDB elevado indica una observación o coordenada pobremente revisada.
- BNR*: se emplea como medida para determinar la influencia de un posible error en las observaciones de las coordenadas ajustadas. El BNR es un parámetro sin dimensión que combina la influencia de una sola observación con todas las coordenadas. Se puede interpretar como la relación que existe entre la fiabilidad y la precisión. Lo más deseable es que el BNR sea homogéneo a lo largo de toda la red.

Analizando las dos estadísticas MDB y BNR de ambos cálculos, se observa que los resultados de este análisis son aceptables y homogéneos, con lo cual se llega a la conclusión que el total de las observaciones han tenido una revisión lo suficiente exhaustiva, por medio del software, para que la fiabilidad de los resultados sea aceptable.

Siguiendo el orden de la tabla del informe de pruebas y errores estimados (véase anejos página 10) se llega a la prueba W (explicada en el apartado 3.2.2.) donde se muestran una serie de valores, los cuales indican si se ha pasado esta prueba o por lo contrario se ha rechazado para alguno de los vectores. Este hecho depende de la sigma a priori establecida al inicio del ajuste, de 35 para ambos cálculos, con la que se obtiene un valor máximo para la prueba W igual a 3,29, del cual los valores resultantes no deben rebasarlo para que puedan pasar la prueba y las observaciones se puedan considerar aceptables. En el caso de la red estudiada, ninguna de las componentes de los vectores supera el valor crítico.

Para finalizar, en esta misma tabla se muestra el valor de la prueba T-Student para cada vector calculado en referencia de los grados de libertad de la red ($n-h$, observaciones – incógnitas ($105-39=66$)), esto detectará si existen errores groseros en el cálculo de los vectores de nuestra red. En el caso que en algún valor se muestre una alarma, significará que la observación no será aceptable todavía.

* Fuente: teoría de Leica Geo Office.

En los informes se observaba que los resultados estadísticos del vector E-C no eran aceptables y además hacia empeorar el ajuste general de la red, se decidió prescindir de él asegurándose de que a estos mismos vértices les concurrieran tres vectores diferentes.

Una vez hecho el estudio de los informes y ver que todos los datos entraban en tolerancia y eran aceptables, se concluyó que las coordenadas eran lo suficientemente precisas. Por ello, los vértices son los siguientes: (en rojo se muestran los valores superiores a 1 cm)

Leica Geo Office															
GPS							GPS+GLONASS						Diferencias		
	X _{UTM} (m)	Desv. Est. X	Y _{UTM} (m)	Desv. Est. Y	Alt. Elip (m)	Desv. Est. Altura	X _{UTM} (m)	Desv. Est. X	Y _{UTM} (m)	Desv. Est. Y	Alt. Elip (m)	Desv. Est. Altura	ΔX (m)	ΔY (m)	ΔZ (m)
A	493312,276	0,002	4635715,581	0,002	213,207	0,005	493312,278	0,002	4635715,584	0,002	213,202	0,005	-0,001	-0,002	0,006
B	493581,172	0,002	4635718,799	0,003	211,111	0,006	493581,171	0,003	4635718,794	0,003	211,108	0,007	0,001	0,005	0,002
C	493932,347	0,002	4635847,424	0,003	226,757	0,006	493932,347	0,003	4635847,418	0,003	226,754	0,007	0,000	0,006	0,003
CASS	492048,909	0,000	4636777,467	0,000	251,787	0,000	492048,909	0,000	4636777,467	0,000	251,787	0,000	0,000	0,000	0,000
D	494071,359	0,003	4635799,432	0,003	226,858	0,007	494071,359	0,003	4635799,423	0,003	226,846	0,008	0,001	0,010	0,012
E	494481,456	0,003	4636261,974	0,003	315,156	0,007	494481,458	0,003	4636261,962	0,004	315,162	0,009	-0,002	0,012	-0,006
F	494315,390	0,003	4635946,709	0,004	229,578	0,010	494315,393	0,003	4635946,696	0,004	229,565	0,009	-0,003	0,012	0,013
G	494553,552	0,003	4635839,873	0,003	269,406	0,007	494553,552	0,003	4635839,866	0,004	269,406	0,008	0,000	0,008	0,000
H	495063,383	0,003	4636726,845	0,003	327,280	0,007	495063,381	0,003	4636726,839	0,004	327,285	0,007	0,002	0,006	-0,004
I	495111,687	0,003	4635896,527	0,004	291,787	0,008	495111,685	0,003	4635896,520	0,004	291,795	0,008	0,003	0,007	-0,009
J	495408,403	0,002	4637159,682	0,002	359,211	0,006	495408,405	0,002	4637159,678	0,003	359,222	0,006	-0,001	0,003	-0,011
K	495209,933	0,003	4636162,490	0,004	301,685	0,009	495209,930	0,003	4636162,482	0,004	301,688	0,010	0,004	0,007	-0,003
L	496228,676	0,003	4636726,220	0,003	445,611	0,007	496228,676	0,003	4636726,217	0,004	445,615	0,008	0,000	0,003	-0,004

Tabla 6.Coordenadas, desviaciones y diferencias de las coordenadas obtenidas a partir de los dos ajustes con Leica Geo Office.

3.3.6. Ajustes de la red con Topcon Tools.

En este apartado al igual que en el anterior se explicarán los parámetros establecidos para el cálculo de la red, como el resultado de las estadísticas.

Topcon Tools v 7.5, se basa en un ajuste mediante el método de mínimos cuadrados proporcionando al ajuste mayor precisión. Además este programa, permite que usuarios relativamente poco experimentados puedan realizar trabajos de este tipo con mayor facilidad, puesto que se suelen eliminar ciertas opciones de parámetros avanzados de cálculo que el software continuará utilizando internamente, de manera oculta, con valores por defecto que se consideran válidos para un tratamiento estándar de los datos.

Para el ajuste de la red con Topcon Tools, se han empleado las dos soluciones disponibles con las que se han tomado los datos, GPS y GPS+GLONASS.

Para la realización del ajuste, se tuvo en cuenta que los parámetros de éste fueran lo más parecidos a los del apartado anterior, puesto que posteriormente se realizarán una serie de comparaciones. Los parámetros empleados para este programa como el nivel de confianza, fue del 99% es decir 0,1 (Alpha) al igual que en Leica Geo Office tanto para la señal GPS como la de GPS+GLONASS de nuestras observaciones. También se escogió como criterio de rechazo el *criterio Tau* puesto que se basa en desechar aquellas observaciones en las que los residuos no son tolerables. En cuanto a los valores de sigma a priori, estos han ido variando, tanto como para nuestro caso de GPS como para el de GPS+GLONASS (véase Ilustración 5 y 6).

Estos valores para la sigma a priori, sirven para establecer una tolerancia de aceptación en nuestro ajuste, son: en el caso de las observaciones en GPS, para GPS Hz=3 y GPS Vert.=3, mientras que en el caso de GPS+GLONASS es para Hz=3.5 y Vert.=3.

General	A priori UWE
Confidence Level	
<input type="radio"/> 68%	
<input type="radio"/> 95%	
<input checked="" type="radio"/> 99%	
Rejection Criterion	
<input type="radio"/> By Quality Control	
<input checked="" type="radio"/> Tau Criterion	
<input checked="" type="checkbox"/> Analyse Repeated Observations	
<input checked="" type="checkbox"/> Analyse Identical Points	
<input checked="" type="checkbox"/> Control Tie Analysis	

Ilustración 5. Parámetros generales del ajuste.

General	A priori UWE
GPS vector(3D) or GPS Horz	3
GPS vector, Vert	3
TS Measurement, SD	1
TS Measurement, HA	1
TS Measurement, VA	1

General	A priori UWE
GPS vector(3D) or GPS Horz	3,5
GPS vector, Vert	3
TS Measurement, SD	1
TS Measurement, HA	1
TS Measurement, VA	1

Ilustración 6. Parámetros de la sigma a priori para GPS (izq.) y GPS+GLONASS (dcha.).

Para empezar a realizar el cálculo de los vectores se coloca como vértice de control, igual que con el programa Leica Geo Office, la estación de referencia del ICC de Cassà de la Selva (CASS). A partir de aquí se efectúa el cálculo de cada uno de los vectores comprobando que resuelvan las ambigüedades. Además se tienen que poner los datos referentes a la misma como las coordenadas exactas facilitadas por el ICC y los offsets de L1 y L2, la altura de antena.

Tras realizar el ajuste por primera vez se detectaron errores demasiado grandes, los cuales redujeron considerablemente al realizar una “limpieza” en las observaciones de los satélites. Esta “limpieza” se produce a que en algunos vértices en los que existe una gran densidad de árboles los cuales hacen que en ocasiones se corte la señal. En este programa a diferencia del anterior la máscara de elevación se coloca al inicio y se determina una máscara de 15° , lo que es un inconveniente si se sabe que en alguna de las observaciones de campo no hay un horizonte demasiado despejado.

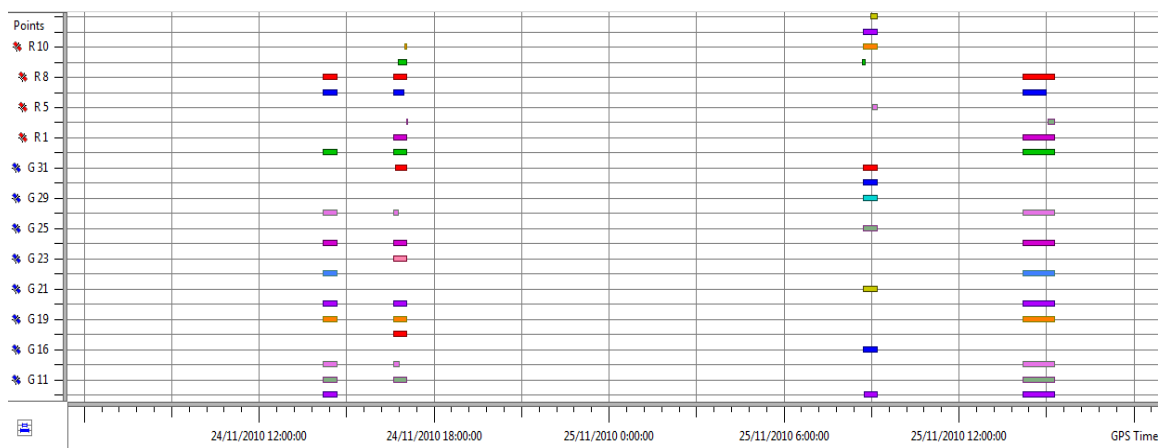


Ilustración 7. Observaciones de satélites según tiempo de observación.

El informe que sale inicialmente es el de control de análisis del enlace global de la red donde el valor de UWE, explicado posteriormente, debe estar entre el rango que indica la última columna para los puntos queden bien ajustados.

Control Tie Analysis: skipped						
Subnetwork A, B, C, ... (Horizontal Minimal Constraint + Vertical Minimal Constraint)						
Type	Adjusted Points	Fixed Points	Weighted Points	Equations (Used/Rejected) GPS	UWE	UWE Bounds
Horz	13	1	0	34	1.25	[0.73,1.28]
Vert	13	1	0	34	1.23	[0.63,1.39]

Ilustración 8. Ejemplo de informe inmediato al ajuste (caso de GPS).

La UWE que se comenta antes es la varianza a posteriori respecto a la de a priori. Si el valor es mayor que uno significa que los errores a posteriori son mayores que los esperados en un principio. A la derecha la columna de UWE Bounds es el rango permisible del valor de UWE. A diferencia de la red calculada con Leica Geo Office los residuos no han sido excesivamente grandes por lo que no se ha tenido que prescindir, en ninguno de los dos casos, del vector EC que daba problemas anteriormente.

Una vez el valor de la varianza a posteriori respecto a la de a priori han entrado entre los valores determinados se hace una configuración del informe final para que muestre aquella información que se desea, como las coordenadas ajustadas, residuos, etc. A continuación se muestra su contenido.

Adjustment type: Plane + Height, Minimal constraint
 Confidence level: 99 %
 Number of adjusted points: 13
 Number of plane control points: 1
 A priori GPS plane or 3D UWE: 3
 Number of used GPS vectors: 34
 A posteriori plane or 3D UWE: 1,253595 , Bounds: (0,7311568 , 1,279042)
 Number of height control points: 1
 A priori GPS Vert UWE: 3
 A posteriori height UWE: 1,234035 , Bounds: (0,6266796 , 1,394796)

Fuente: Cabecera del informe GPS de Topcon Tools.

Adjustment type: Plane + Height, Minimal constraint
 Confidence level: 99 %
 Number of adjusted points: 13
 Number of plane control points: 1
 A priori GPS plane or 3D UWE: 3,5
 Number of used GPS vectors: 34
 A posteriori plane or 3D UWE: 1,179471 , Bounds: (0,7311568 , 1,279042)
 Number of height control points: 1
 A priori GPS Vert UWE: 3
 A posteriori height UWE: 1,021661 , Bounds: (0,6266796 , 1,394796)

Fuente: Cabecera del informe GPS+GLONASS de Topcon Tools.

Seguidamente se exponen los resultados de los residuos vectores obtenidos de los dos cálculos. En la Tabla 7 se observa que los residuos más elevados se encuentran en la cota (se muestran de color rojo siendo mayores a 2 cm y en amarillo los mayores a 1 cm). También se observa que en el vector C-E en GPS los residuos de las tres componentes dan mayores a 1 cm lo que quiere decir que éste ha sufrido algún tipo de problema en la toma de datos.

	TOPCON TOOLS					
	GPS			GPS+GLONASS		
	Res e (m)	Res n (m)	Res u (m)	Res e (m)	Res n (m)	Res u (m)
A-B	0,003	0,003	-0,008	0,001	0,002	-0,006
A-C	-0,001	-0,002	0,006	0,002	-0,001	0,007
A-CASS	0,001	0,004	-0,001	0,001	0,008	-0,005
A-CASS	-0,002	-0,015	0,001	-0,003	-0,006	-0,002
A-CASS	-0,003	-0,009	-0,002	0,001	0,000	0,004
A-J	-0,002	-0,005	0,010	-0,002	-0,003	0,003
B-C	0,001	-0,001	-0,001	0,000	0,001	-0,004
B-D	0,001	0,002	0,002	0,000	0,003	0,000
B-J	0,003	0,007	-0,009	0,003	0,007	-0,014
B-L	-0,003	-0,004	-0,006	0,000	-0,007	0,004
C-D	0,007	-0,013	-0,005	0,007	-0,008	0,001
C-E	-0,012	0,012	0,011	-0,008	0,016	0,010
C-F	0,003	-0,008	-0,010	0,001	-0,007	-0,011
C-G	0,003	-0,004	0,008	0,002	-0,002	0,002
CASS-J	0,002	0,000	-0,001	0,000	0,004	-0,011
CASS-J	-0,003	0,000	0,016	-0,005	-0,002	0,004
CASS-J	0,000	0,005	-0,008	0,000	-0,001	-0,002
D-E	0,002	-0,006	0,001	0,002	-0,006	-0,005
D-F	0,003	0,002	0,006	0,006	0,002	0,013
D-G	0,003	0,004	-0,025	0,004	0,003	-0,037
E-F	-0,004	0,007	-0,004	-0,005	0,007	-0,010
E-G	-0,009	0,006	0,000	-0,005	0,007	0,000
E-H	0,005	0,000	0,028	0,006	0,000	0,022
F-G	0,009	-0,012	-0,015	0,006	-0,009	-0,023
G-H	-0,002	-0,003	-0,005	0,000	-0,003	-0,018
G-I	-0,002	0,002	0,011	-0,002	0,006	0,005
H-I	-0,001	-0,003	0,002	0,002	-0,002	0,001
H-J	0,000	0,001	-0,020	0,003	-0,001	0,002
H-K	0,003	0,004	0,022	0,000	0,000	-0,001
H-L	0,003	-0,001	-0,007	-0,001	0,001	-0,003
I-J	0,001	0,008	-0,007	0,003	0,009	-0,006
I-K	-0,003	-0,009	0,013	-0,001	-0,003	0,010
J-K	0,002	0,008	-0,043	0,004	0,016	-0,045
J-L	0,001	0,004	0,010	0,000	0,006	-0,001

Tabla 7. Residuos de GPS y GPS+GLONASS con Topcon Tools.

Para finalizar el análisis del informe que nos resulta del ajuste, se muestra una tabla donde indica las desviaciones estándar para cada una de las componentes de las coordenadas topocéntricas (E, N y U) de los puntos y la componente planimétrica de los mismos, con ellas podemos hacernos una idea de fiabilidad que se ha obtenido. Analizando

los valores del ajuste realizado con GPS y con la composición de GPS+GLONASS por independiente podemos sacar las siguientes conclusiones, siempre dejando aparte los puntos radiados con GPS puesto que no están dentro del ajuste:

En el ajuste con GPS únicamente, el mayor valor de la componente E y de N es de 6 mm en el punto F, lo cual es razonable a pesar de que se hizo con más tiempo de observación porque el horizonte no era demasiado bueno, aunque también tienen la misma magnitud los puntos I y K en la última de las componentes; por contra en cota (U) el valor más elevado pertenece al punto K con una magnitud de 13 mm, siendo bastante homogénea con el resto de valores que rondan entre 9 y 12 mm la mayoría, lo cual es normal puesto que siempre hay menos precisión en altimetría que planimetría. Esto nos indica que en nuestro ajuste al ser los valores relativamente bajos se puede considerar que éste tiene buena precisión.

En cuanto al ajuste con GPS+GLONASS realizado, se puede observar tanto en la componente E y en la N que los valores son sensiblemente más bajos que en el caso anterior de GPS, 5 mm en la mayoría de los puntos en E y de 6 mm en la N para el vértice K, como también para este último vértice tiene el mayor valor en la componente U que es de 10 mm.

Podemos decir entonces, que en ambos casos de cálculo de ajuste el vértice K puede estar influenciado por algún tipo de error aun entrando en tolerancia. Por tanto, K y F, tendrán menor precisión que el resto de vértices.

Concluyendo con este apartado, daremos como buenas las coordenadas de los vértices obtenidas en ambos casos, siendo: (en rojo se indican aquellos valores mayores a 1 cm)

	Topcon Tools														
	GPS						GPS+GLONASS						Diferencias		
	X _{UTM} (m)	Std Dev e (m)	Y _{UTM} (m)	Std Dev n (m)	Alt.Elíp (m)	Std Dev u (m)	X _{UTM} (m)	Std Dev e (m)	Y _{UTM} (m)	Std Dev n (m)	Alt.Elíp (m)	Std Dev u (m)	ΔX	ΔY	Δh
A	493312,274	0,003	4635715,580	0,004	213,201	0,008	493312,275	0,003	4635715,584	0,003	213,197	0,004	-0,001	-0,004	0,004
B	493581,170	0,004	4635718,800	0,004	211,104	0,009	493581,172	0,004	4635718,800	0,004	211,104	0,006	-0,002	0,000	0,000
C	493932,345	0,004	4635847,424	0,005	226,751	0,009	493932,348	0,004	4635847,423	0,004	226,753	0,006	-0,003	0,001	-0,002
CASS	492048,909	0,000	4636777,467	0,000	251,787	0,000	492048,909	0,000	4636777,467	0,000	251,787	0,000	0,000	0,000	0,000
D	494071,356	0,005	4635799,433	0,005	226,852	0,010	494071,358	0,005	4635799,431	0,005	226,849	0,007	-0,002	0,002	0,003
E	494481,451	0,005	4636261,979	0,005	315,151	0,011	494481,454	0,005	4636261,976	0,005	315,149	0,008	-0,003	0,003	0,002
F	494315,385	0,006	4635946,710	0,006	229,567	0,012	494315,389	0,005	4635946,708	0,005	229,568	0,009	-0,004	0,002	-0,001
G	494553,549	0,005	4635839,876	0,005	269,398	0,011	494553,553	0,005	4635839,872	0,005	269,403	0,008	-0,004	0,004	-0,005
H	495063,377	0,005	4636726,847	0,005	327,269	0,011	495063,381	0,005	4636726,843	0,005	327,284	0,008	-0,004	0,004	-0,015
I	495111,684	0,005	4635896,532	0,006	291,780	0,012	495111,685	0,005	4635896,527	0,005	291,794	0,008	-0,001	0,005	-0,014
J	495408,401	0,003	4637159,679	0,004	359,206	0,008	495408,402	0,003	4637159,679	0,004	359,209	0,006	-0,001	0,000	-0,003
K	495209,937	0,005	4636162,490	0,006	301,696	0,013	495209,933	0,005	4636162,484	0,006	301,701	0,010	0,004	0,006	-0,005
L	496228,671	0,005	4636726,217	0,005	445,600	0,011	496228,676	0,005	4636726,214	0,005	445,612	0,009	-0,005	0,003	-0,012

Tabla 8. Coordenadas, desviaciones y diferencias de las coordenadas obtenidas a partir de los dos ajustes con Topcon Tools.

3.4. Comparación de los resultados y conclusiones.

En este apartado se analizan los resultados obtenidos de los dos programas con cada situación de cálculo. Se compararán las coordenadas finales ajustadas de los vértices obtenidas mediante observaciones GPS y GPS+GLONASS, así como sus vectores. También se analizarán y compararán las estadísticas de precisión obtenidas para cada cálculo.

3.4.1. GPS vs GPS+GLONASS con Leica Geo Office.

En este punto se compararán las diferencias entre las componentes de los vectores y las coordenadas obtenidas con los dos casos de cálculo de la red.

		Diferencias Vectores LGO		
		ΔX	ΔY	ΔZ
A	B	-0,015	0,005	0,000
A	C	-0,006	-0,005	0,016
B	C	-0,003	-0,002	0,003
C	D	0,004	0,003	0,007
CASS	J	-0,007	-0,005	-0,003
CASS	J	0,000	-0,001	-0,002
CASS	A	0,012	-0,005	0,007
CASS	A	0,000	0,000	0,000
CASS	J	0,003	0,002	0,002
CASS	A	0,000	0,000	0,000
D	B	-0,002	0,001	-0,010
E	D	0,005	0,000	0,005
E	C	-0,012	0,007	0,000
F	E	-0,024	-0,001	-0,018
F	C	0,000	-0,002	-0,001
F	D	-0,002	0,004	-0,004
G	H	0,002	0,000	0,000
G	E	-0,001	-0,001	-0,003
G	D	0,000	0,000	0,000
G	C	0,000	0,000	0,000
G	F	0,004	-0,005	0,003
H	K	0,000	0,000	0,000
H	I	0,000	0,000	0,000
H	E	-0,005	0,002	0,007
I	K	0,011	0,001	0,008

I	G	0,013	-0,005	0,020
J	K	-0,011	0,006	-0,003
J	I	-0,001	0,000	-0,001
J	L	-0,002	0,003	0,002
J	A	0,030	0,002	0,014
J	B	0,027	0,007	0,012
J	H	0,000	0,000	0,000
L	H	0,000	0,000	0,000
L	B	-0,008	0,005	0,009

Tabla 9. Diferencias entre las componentes de los vectores geocéntricos con Leica Geo Office de las soluciones GPS y GPS+GLONASS.

En la tabla anterior se muestran los valores de las diferencias de las componentes geocéntricas obtenidas de los vectores calculados en GPS y GPS+GLONASS. Como se puede observar los valores más elevados se encuentran en la componente ΔX el cual es de 3 cm en el vector J-A, mientras que en las otras componentes los resultados son de 7 mm en ΔY en el vector J-B y en ΔZ el mayor valor es de 2 cm en el vector I-G. En el vector E-C no hay solución puesto que, anteriormente explicado en el apartado 3.4. , se decidió prescindir de él ya que causaba muchos errores en el ajuste.

Calculando la media de las diferencias de coordenadas geocéntricas en valor absoluto obtenemos unos valores de 6 mm en X y 2 mm en Y, mientras que en la componente Z es de 5 mm; comparándolos con la precisión que describen las prescripciones técnicas de los receptores (apartado 3.3.3.) y dependiendo directamente de la distancia media de las líneas base, provenientes de calcular la tolerancia con una distancia media de 1,12 Km saliendo una magnitud de $\pm 3,56$ mm en planimetría y de 5,56 en altimetría. Se llega a la conclusión que las coordenadas entran en tolerancia con valores que no superan los 7,12 mm en planimetría y los 11,12 mm en cota.

A continuación se muestran las diferencias entre las coordenadas en la proyección UTM calculadas con el programa con GPS y la combinación del mismo con GLONASS.

	Diferencias coordenadas LGO		
	ΔX (m)	ΔY (m)	ΔZ (m)
A	-0,001	-0,002	0,006
B	0,001	0,005	0,002
C	0,000	0,006	0,003
CASS	0,000	0,000	0,000
D	0,001	0,010	0,012
E	-0,002	0,012	-0,006

F	-0,003	0,012	0,013
G	0,000	0,008	0,000
H	0,002	0,006	-0,004
I	0,003	0,007	-0,009
J	-0,001	0,003	-0,011
K	0,004	0,007	-0,003
L	0,000	0,003	-0,004

Tabla 10. Diferencias entre coordenadas obtenidas del ajuste de las soluciones GPS y GPS+GLONASS con Leica Geo Office.

Para sacar una mayor conclusión nos fijamos en las desviaciones estándar de las componentes de las coordenadas en cada uno de los dos casos puesto que nos facilitan una gran información en cuanto a su precisión. Como se observa en la Tabla 2. Desviaciones estándar con Leica Geo Office (véase en el anexo página 32), las desviaciones son ligeramente inferiores para la combinación de ambos, con lo que se deduce que estas son algo más precisas y nos decantaremos más por ellas porque los valores de las diferencias sea por el hecho que las de GPS se dispersen de las otras.

3.4.2. GPS vs GPS+GLONASS con Topcon Tools.

Al igual que en el apartado anterior, se mostrarán las diferencias entre las componentes de los vectores y las componentes de las coordenadas para poder hallar cuál es el proceso de cálculo con mayor precisión del programa.

		Diferencias Vectores TT		
		ΔX	ΔY	ΔZ
A	B	-0,009	0,000	-0,002
A	C	-0,008	-0,005	-0,003
B	C	0,000	0,000	0,000
C	D	0,002	0,001	-0,003
CASS	J	-0,003	0,001	-0,002
CASS	J	0,005	0,001	0,007
CASS	A	0,000	0,000	0,000
CASS	A	0,001	-0,003	-0,013
CASS	J	0,000	0,000	0,001
CASS	A	-0,004	0,001	-0,002
D	B	0,003	0,001	0,006
E	D	0,002	-0,002	0,003
E	C	0,005	-0,004	0,002
F	E	0,002	0,000	0,002
F	C	0,001	0,002	0,002
F	D	-0,008	-0,005	-0,007

G	H	0,001	-0,001	0,003
G	E	-0,005	-0,005	-0,005
G	D	0,002	-0,003	0,004
G	C	0,003	0,000	0,002
G	F	0,005	0,003	0,002
H	K	0,020	0,012	0,026
H	I	0,002	0,000	0,001
H	E	-0,007	-0,001	-0,007
I	K	0,012	0,003	0,004
I	G	-0,001	0,003	-0,004
J	K	0,001	0,002	-0,001
J	I	0,012	-0,001	0,002
J	L	0,000	-0,003	0,003
J	A	-0,001	0,000	0,001
J	B	0,001	0,001	0,001
J	H	-0,005	0,000	-0,008
L	H	0,001	0,002	-0,002
L	B	-0,021	-0,008	-0,010

Tabla 11. Diferencias entre las componentes de los vectores geocéntricos con Topcon Tools de las soluciones GPS y GPS+GLONASS.

Al igual que en el apartado anterior, se puede observar que en la tabla 11, la componente ΔX el cual es de 2,1 cm en el vector L-B, mientras que en las otras componentes los resultados son de 1,2 cm en ΔY en el vector H-K y en ΔZ el mayor valor es de 2,6 cm en mismo vector que en la diferencia de la componente Y. En este caso al calcular con Topcon Tools no ha sido necesario eliminar el vector E-C puesto que no causa ningún tipo de error.

Con la misma precisión del aparato y la misma distancia media de línea de base (1,12 Km) del ajuste de la red, también entra en tolerancia ya que la media de las diferencias en valor absoluto tanto como para la componente X y Z es de 4 mm mientras que para la componente Y es de 2 mm.

A continuación se muestran las diferencias obtenidas entre las coordenadas.

Diferencias coordenadas TT			
	ΔX	ΔY	Δh
A	-0,001	-0,004	0,004
B	-0,002	0,000	0,000
C	-0,003	0,001	-0,002
CASS	0,000	0,000	0,000
D	-0,002	0,002	0,003
E	-0,003	0,003	0,002
F	-0,004	0,002	-0,001

G	-0,004	0,004	-0,005
H	-0,004	0,004	-0,015
I	-0,001	0,005	-0,014
J	-0,001	0,000	-0,003
K	0,004	0,006	-0,005
L	-0,005	0,003	-0,012

Tabla 12. Diferencias entre coordenadas obtenidas del ajuste de las soluciones GPS y GPS+GLONASS con Topcon Tools.

Seguidamente observamos las desviaciones estándar de las componentes en cada uno de los dos casos puesto que a menor sea el valor de la desviación mayor será la precisión de la coordenada.

Como se observa en la Tabla 1. Desviaciones estándar con Topcon Tools (véase en el anejos página 32), las desviaciones son ligeramente similares para ambos casos, pero como se puede observar en la componente topocéntrica U es mínimamente inferior en el caso de cálculo con GPS+GLONASS por lo que las coordenadas en cota son sensiblemente más fiables.

3.4.3. Comparación entre programas.

En este apartado se procederá a la comparación de ambos software y a la resolución de cuáles son las coordenadas con mayor precisión y por tanto las utilizadas para el posterior trabajo en gabinete de los levantamientos con estación total.

Debido a la densidad de las tablas generadas se analizará el contenido de éstas (véase anejos página 35). En dichas tablas se pueden observar las diferencias que existen entre los vectores calculados en GPS y GPS+GLONASS tanto para Leica Geo Office como para Topcon Tools.

En primer lugar en el apartado de diferencia entre los dos programas, en la comparación de GPS se puede observar que la mayor diferencia se encuentra en el vector H-K para las tres componentes geocéntricas, de 28 mm en la componente X otros 14 mm para la componente Y y finalmente 27 mm para la Z. En este caso se observan que todos los valores obtenidos tienden a una cierta homogeneidad, con un máximo de un centímetro, menos el vector mencionado con lo cual podemos deducir que puede que haya habido algún problema en el proceso de cálculo, puesto que en Topcon Tools ya se detectaron diferencias elevadas, y en Leica Geo Office se tuvo que hacer una limpieza de satélites exhaustiva.

		GPS		
		ΔX	ΔY	ΔZ
A	B	0,001	0,001	0,000
A	C	0,000	0,001	0,002
B	C	0,000	0,001	0,000
C	D	0,007	0,004	0,005
CASS	J	0,007	0,000	0,009
CASS	J	0,002	0,000	0,001
CASS	A	0,011	0,001	0,004
CASS	A	0,010	0,001	0,009
CASS	J	0,015	0,004	0,011
CASS	A	0,000	0,002	0,001
D	B	0,001	0,000	0,001
E	D	0,000	0,001	0,000
E	C	0,004	0,004	0,002
F	E	0,013	0,002	0,007
F	C	0,005	0,003	0,003
F	D	0,001	0,003	0,002
G	H	0,007	0,003	0,010
G	E	0,005	0,001	0,005
G	D	0,019	0,006	0,019
G	C	0,001	0,000	0,001
G	F	0,006	0,002	0,009
H	K	0,028	0,014	0,027
H	I	0,003	0,001	0,004
H	E	0,009	0,002	0,007
I	K	0,018	0,004	0,005
I	G	0,012	0,003	0,019
J	K	0,007	0,002	0,002
J	I	0,005	0,003	0,010
J	L	0,007	0,002	0,006
J	A	0,024	0,000	0,008
J	B	0,002	0,002	0,001
J	H	0,008	0,002	0,010
L	H	0,002	0,000	0,008
L	B	0,006	0,003	0,009

Tabla 13. Diferencia de los vectores entre LGO y TT con observables GPS.

Por otro lado en el caso de GPS+GLONASS nos podemos encontrar con diferencias máximas en la componente X de 26 mm para el vector J-B, siendo un caso puntual, mientras que en el vector G-D se observa que tanto en la componente Y como en la Z obtiene el mayor valor del conjunto, de 9 mm en Y y 23 mm en Z, se puede considerar que

es el peor vector de esta comparativa puesto que en X alcanza un valor de 21 mm esto nos indica que al igual que en el caso anterior pueda haber existido algún problema en el proceso de cálculo.

		GPS+GLONASS		
		ΔX	ΔY	ΔZ
A	B	0,007	0,005	0,002
A	C	0,002	0,001	0,020
B	C	0,002	0,003	0,003
C	D	0,009	0,005	0,005
CASS	J	0,010	0,007	0,010
CASS	J	0,003	0,003	0,008
CASS	A	0,001	0,005	0,003
CASS	A	0,009	0,002	0,004
CASS	J	0,012	0,002	0,010
CASS	A	0,004	0,001	0,003
D	B	0,002	0,002	0,005
E	D	0,007	0,001	0,008
E	C	0,003	0,001	0,005
F	E	0,008	0,001	0,009
F	C	0,007	0,003	0,004
F	D	0,009	0,001	0,010
G	H	0,005	0,002	0,013
G	E	0,011	0,005	0,013
G	D	0,021	0,009	0,023
G	C	0,004	0,000	0,003
G	F	0,015	0,000	0,015
H	K	0,008	0,002	0,001
H	I	0,001	0,001	0,003
H	E	0,021	0,001	0,007
I	K	0,017	0,002	0,009
I	G	0,001	0,001	0,003
J	K	0,019	0,006	0,004
J	I	0,016	0,002	0,011
J	L	0,005	0,004	0,005
J	A	0,006	0,002	0,007
J	B	0,026	0,006	0,013
J	H	0,003	0,002	0,002
L	H	0,003	0,002	0,006
L	B	0,023	0,000	0,008

Tabla 14. Diferencia de los vectores entre LGO y TT con observables GPS+GLONASS.

Seguidamente se muestra la tabla de comparaciones de coordenadas:

	Diferencias entre coordenadas con LGO y TT					
	GPS			GPS+GLONASS		
	X (m)	Y (m)	Alt. Elip	X (m)	Y (m)	Alt. Elip
A	-0,002	-0,001	-0,006	-0,003	0,000	-0,005
B	-0,002	0,001	-0,007	0,001	0,006	-0,004
C	-0,002	0,000	-0,006	0,001	0,005	-0,001
CASS	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
D	-0,003	0,001	-0,006	-0,001	0,008	0,003
E	-0,005	0,005	-0,005	-0,004	0,014	-0,013
F	-0,005	0,001	-0,011	-0,004	0,012	0,003
G	-0,003	0,003	-0,008	0,001	0,006	-0,003
H	-0,006	0,002	-0,011	0,000	0,004	-0,001
I	-0,003	0,005	-0,007	0,000	0,007	-0,001
J	-0,002	-0,003	-0,005	-0,003	0,001	-0,013
K	0,004	0,000	0,011	0,003	0,002	0,013
L	-0,005	-0,003	-0,011	0,000	-0,003	-0,003

Tabla 15. Diferencias de coordenadas entre ambos programas.

De forma global las diferencias de las coordenadas calculadas con GPS+GLONASS son más pequeñas que las otras, con lo cual el cálculo ha sido más similar entre los programas y suponemos que por tanto hay algo más de precisión en el cálculo de las mismas. Entrando en detalle las coordenadas X geocéntricas con GPS tienen un valor absoluto máximo de 6 mm en H, mientras que en el otro es de 4 en E y F, en la coordenada Y es de 5 mm en la primera en los vértices E e I y en la segunda diferencia de 14 mm en E y por último en Z de 11 y 13 mm respectivamente. En GPS+GLONASS el vértice que ofrece más diferencias en el E, esto puede ser debido a que en Leica Geo Office se le desechó uno de los vectores que llegaban a él, mientras que en Topcon Tools no se quitó porque no daba ningún error, lo cual puede influir introduciendo discrepancias al cálculo global de la red. Cabe decir que las diferencias del vértice llamado CASS son cero puesto que son las coordenadas de la estación permanente de Cassà de la Selva ofrecidas por el ICC, la cual se ha tomado se ha tomado como punto de control del ajuste para georreferenciar nuestra red, por eso las coordenadas no cambian de un programa al otro.

Finalmente daremos como buenas las coordenadas obtenidas mediante observables GPS+GLONASS con el cálculo del programa Topcon Tools puesto que en el proceso de éste no ha sido necesario la eliminación del vector E-C como es el caso de Leica Geo Office. También se ha podido observar en la tabla de residuos (véase anejos página 34) son bastante bajos, tan solo en dos vectores la componente “n” supera ligeramente el centímetro mientras que en la “e” ninguno sobrepasa los 6 mm, en cuanto a la componente “u” (cota) siempre es algo más delicada y en este caso superan el centímetro 11 de los 34 vectores

utilizados en el ajuste aunque dos de ellos sobrepasan los 3 centímetros que son el D-G y J-K; el primero de ellos habíamos visto anteriormente en la comparación de programas que ya daba diferencias bastante grandes lo que ahora podemos ver que ha sido en este ajuste que tomamos como “idóneo” donde se ha podido introducir algún tipo de error en el cálculo de este vector. Estos resultados de los residuos nos llevan a concluir que las coordenadas iniciales no son muy dispares con las obtenidas después del ajuste y por tanto se han tenido que hacer unas correcciones muy pequeñas.

Otro punto a tener en cuenta para la elección de las mismas ha sido la varianza a posteriori del ajuste cuyos valores han sido ligeramente inferiores en este ajuste que en el de GPS, con un valor de 1,18 en planimetría y 1,02 en cota; esto nos indica que el global del ajuste se ha hecho de forma correcta y el encaje ha sido mejor. Igual que la varianza a posteriori, en la tabla de la desviación estándar (véase anejos página 32) no se encuentran valores de magnitud superior al centímetro, lo que nos está indicando una gran precisión en cada una de las componentes de las coordenadas de cada vértice y por tanto es otro indicador de que el ajuste lo podemos tomar como bueno y estas coordenadas poder usarlas para el posterior cálculo de las poligonales. Las coordenadas elegidas son por tanto:

	GPS+GLONASS Topcon Tools		
	X (m)	Y (m)	Alt.Orto (m)
A	493312,275	4635715,584	163,759
B	493581,172	4635718,800	161,666
C	493932,348	4635847,423	177,315
CASS	492048,909	4636777,467	202,332
D	494071,358	4635799,431	177,412
E	494481,454	4636261,976	265,706
F	494315,389	4635946,708	180,129
F1	494325,915	4635949,684	180,208
G	494553,553	4635839,872	219,967
G1	494562,195	4635843,275	220,339
H	495063,381	4636726,843	277,837
H1	495065,183	4636716,988	277,526
I	495111,685	4635896,527	242,361
J	495408,402	4637159,679	309,758
J1	495405,815	4637165,219	310,742
K	495209,933	4636162,484	252,264
L	496228,676	4636726,214	396,173

Tabla 16. Coordenadas escogidas como más fiables.

F1, G1, H1 y J1 son puntos radiados con GPS para la obtención de la orientación para posteriormente realizar las poligonales.

4. Levantamientos topográficos.

Seguidamente se procederá a la explicación de observaciones y cálculos de las poligonales para hacer los levantamientos y del perfil longitudinal. Para ello, se describirán cada uno de los anillos creados con sus respectivos cierres y tolerancias. Finalmente se hará un cálculo por mínimos cuadrados para cada una de las poligonales para la compensación de las coordenadas finales.

Para la realización de esta parte del trabajo fue necesaria la creación de seis poligonales entorno a los aparatos hidrológicos estacionados en la zona. La señalización de las bases de dichas poligonales fueron los propios vértices de la red creada con GPS, señalizados con hitos, mientras que para las bases que completan la poligonal se materializaron con estacas. Se escogen seis zonas de trabajo donde se realizan cada una de las poligonales para dar coordenadas a estos aparatos, son las siguientes:

- Zona 1. La componen los dos campos de cultivo más al oeste donde se encuentra la poligonal 1. A partir de ésta se radian el pluviómetro de Campàs y la estación de aforo con este mismo nombre. La superficie aproximada es de 2,9 ha.
- Zona 2. Se sitúa en el campo de cultivo al sur de la masía de Mas Bassets. En ella se ha hecho la poligonal número dos compuesta por 5 bases para poder obtener coordenadas de la estación meteorológica, del totalizador que tiene a su lado y de los tres pozos. La superficie de esta zona es de 3 ha.
- Zona 3. Se encuentra bordeando la estación de aforo de Bosc, a la izquierda del camino que va de Mas Bassets a Mas Bóta, después de un pequeño puente que cruza la riera de *Vernegà*. Para poder georreferenciar la estación de aforo bastó con materializar una poligonal de tres bases. La superficie es de unas 0,086 ha.
- Zona 4. Está situada en el primer cruce de caminos que sube de Can Bóta en dirección norte. Corresponde a la poligonal 4 y está formada por 3 bases desde la que se calculan las coordenadas del pluviómetro Mas Bóta. La superficie es de 0,05 ha.
- Zona 5. Está en la parte oeste de la cuenca en un camino secundario que sale del principal que va de Mas Bassets pasando por Puig del Castell, a unos 600 metros

pasado éste. A partir de la poligonal 5 formada por tres bases se radia el pluviómetro de Cantallops.

- Zona 6. Se encuentra más al norte que la poligonal anterior por el mismo camino principal que se accede al anterior a unos 500 metros. Con la poligonal 6 se hace visual al pluviómetro de Capçalera para obtener sus coordenadas.

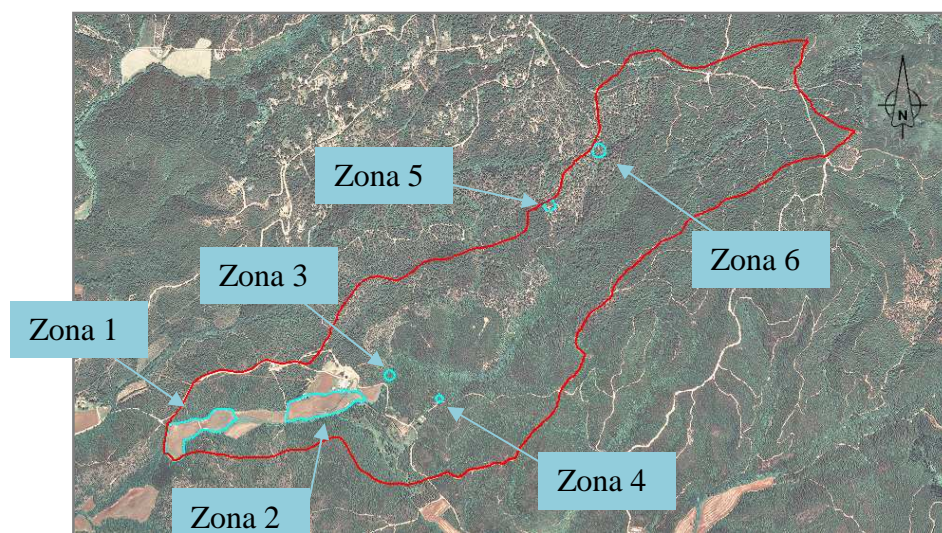


Ilustración 9. Ubicación de las zonas de los levantamientos.

Tanto para las observaciones de los ángulos horizontales y verticales como de las distancias, se realizó mediante el método de Bessel para obtener un valor en círculo directo e inverso y posteriormente hacer el promedio, de esta forma se consigue más precisión y evitar errores en la observación.

El aparato utilizado para el levantamiento, en este caso una estación total de Leica, la Flex Line TS-06, con características:



Ilustración 10. Leica Flex Line TS-06.

Aumentos	30 X
Precisión angular	10 cc
Precisión en distancia	1,5 ± 2 ppm
Niv. esférico prisma	8'
Niv. esférico aparato	6'
Nivel electrónico	2"

Tabla 17. Características técnicas de la estación total.

Para empezar se calcularon las coordenadas aproximadas de cada base de las poligonales para posteriormente aplicarlas en el cálculo de mínimos cuadrados. Para ello, fue necesaria la distancia UTM la cual se tiene que calcular mediante diversas correcciones. Esto es debido a que algunos de los vectores son considerablemente largos se ha de tener en cuenta varios parámetros como la esfericidad terrestre, la reducción al elipsoide o el paso del elipsoide a la proyección UTM. (Véase en el contenido del CD).

También se han calculado las tolerancias angulares para ver si el error angular en cada poligonal era aceptable o no. Sabiendo que la poligonal entra en tolerancia se procede al cálculo de coordenadas aproximadas mediante el acimut corregido y la distancia UTM, a partir de esto observamos si el error de cierre en coordenadas es aceptable.

4.1. Cierres, tolerancias y descripción de las poligonales.

Para poder hacer el cálculo de tolerancias necesitaremos previamente las características técnicas de la estación total (expuestas en el apartado anterior).

A continuación se calcularán los posibles errores sistemáticos cometidos en el momento de la toma de datos. Entre ellos se encuentran el error de dirección, el de puntería, etc. los cuales forman parte del cálculo de la tolerancia angular, la cual se expresa como $T \leq e_a \sqrt{2n}$ donde n es el número de bases en la poligonal. Ésta la compararemos con la diferencia de acimut calculado menos el acimut observado y si este es menor a la tolerancia, la poligonal entrará en tolerancia.

$$\text{Donde:} \quad e_a = \sqrt{e_v^2 + e_d^2 + e_p^2 + e_l^2} \quad (1)$$

$$e_v = \frac{1}{12} S^{cc} \quad (2)$$

$$e_d = \frac{e_s + e_e}{D} r^{cc} \quad (3)$$

$$e_p = \frac{30^{cc}}{A} \left(1 + \frac{4 \cdot A}{100} \right) \quad (4)$$

$$e_l = a_p \quad (5)$$

Además una vez calculados todos los componentes del error angular y el mismo para cada tramo se procede al cálculo del cierre de coordenadas y las tolerancias de las mismas, para ello son necesarios el error longitudinal y el transversal, calculados con las siguientes fórmulas:

$$E_L = \frac{\sqrt{n}}{\sqrt{2}} \cdot \sqrt{e_e^2 + e_s^2 + a^2 + (b \cdot D)^2} \quad (6)$$

$$E_t = \frac{L}{n} \cdot \frac{e_a}{r^{cc}} \cdot \sqrt{2} \cdot \sqrt{\frac{n \cdot (n+1) \cdot (2 \cdot n+1)}{6}} \quad (7)$$

$$T = \sqrt{E_L^2 + E_T^2} \quad (8)$$

$$E_T = \sqrt{x^2 + xy^2} \quad (9)$$

De estas fórmulas deberemos deducir que el error total deberá ser inferior a tolerancia para que las poligonales estén bien observadas y podamos continuar. Como podemos ver a continuación con los valores obtenidos para cada poligonal, donde cada una de ellas tiene incluidos en su geometría dos vértices de la red geodésica calculada para obtener orientación.

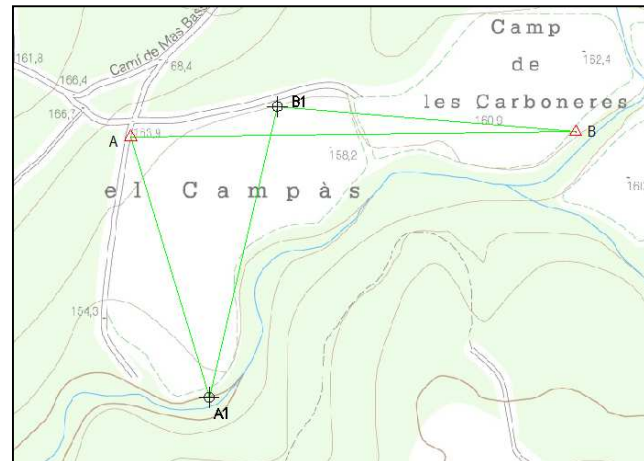
- **Poligonal 1:** por los vértices A y B y dos bases adicionales A1 y B1.

Cierre angular.

ec =	0,0099	g
Correc. tramo =	0,0025	g
T =	0,0105	g

Cierre en coordenadas.

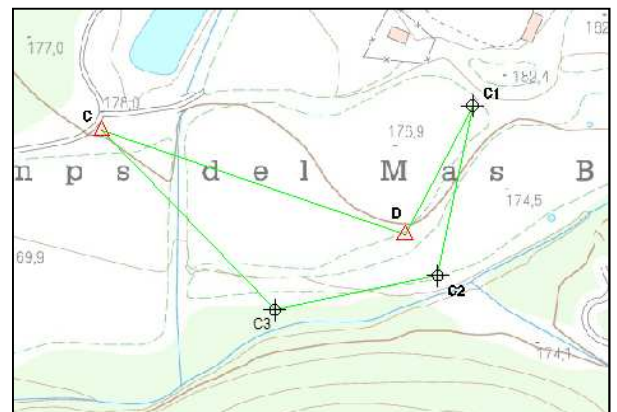
	X (m)	Y (m)	H (m)
ec =	-0,013	-0,017	0,008
E _{total} =	0,0216	ea _{promedio} =	37,0823
E _{longitudinal} =	0,0837	E _{transversal} =	0,0026
Tolerancia=	0,0838		g



- **Poligonal 2:** Formada por los vértices C y D y tres bases adicionales C1, C2 y C3. El punto C está pegado a la estación meteorológica.

Cierre angular.

ec =	-0,0092	g
Correc. tramo =	-0,0018	g
T =	0,0146	g



Cierre en coordenadas.

	X (m)	Y (m)	H (m)
ec =	-0,006	-0,016	-0,001
E _{total} =	0,0175	ea _{promedio} =	46,2999
E _{longitudinal} =	0,0692	E _{transversal} =	0,0026
Tolerancia=	0,0693 g		

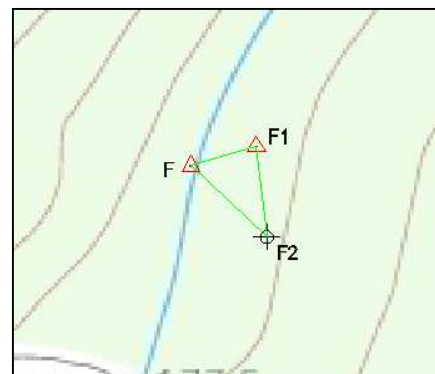
- **Poligonal 3:** Formada por los vértices F y F1 y una base adicional F2.

Cierre angular.

ec =	-0,0010	g
Correc. tramo =	-0,0003	g
T =	0,0504	g

Cierre en coordenadas.

	X (m)	Y (m)	H (m)
ec =	-0,022	-0,006	0,013
E _{total} =	0,0232	ea _{promedio} =	205,9156
E _{longitudinal} =	0,0411	E _{transversal} =	0,0018
Tolerancia=	0,0411 g		



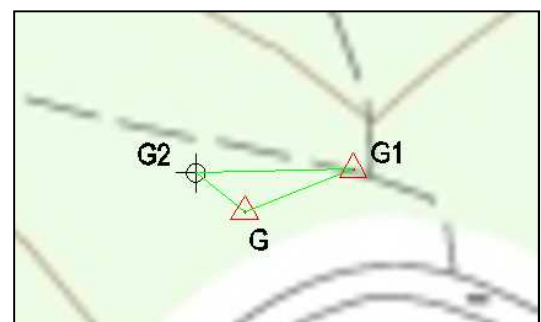
- **Poligonal 4:** Formada por los vértices G y G1 y una base adicional G2.

Cierre angular.

ec =	-0,0463	g
Correc. tramo =	-0,0154	g
T =	0,0875	g

Cierre en coordenadas.

	X (m)	Y (m)	H (m)
ec =	0,008	0,001	0,009
E _{total} =	0,0084	ea _{promedio} =	357,0505
E _{longitudinal} =	0,0459	E _{transversal} =	0,0018
Tolerancia=	0,0460 g		



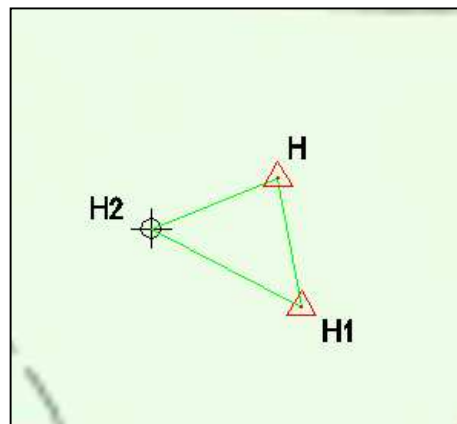
- **Poligonal 5:** Formada por los vértices H y H1 y una base adicional H2.

Cierre angular.

ec =	0,0397	g
Correc. tramo =	0,0132	g
T =	0,0632	g

Cierre en coordenadas.

	X (m)	Y (m)	H (m)
ec =	-0,001	0,007	-0,058
E _{total} =	0,0070	ea _{promedio} =	258,0264
E _{longitudinal} =	0,0413	E _{transversal} =	0,0018
Tolerancia=		0,0414	g



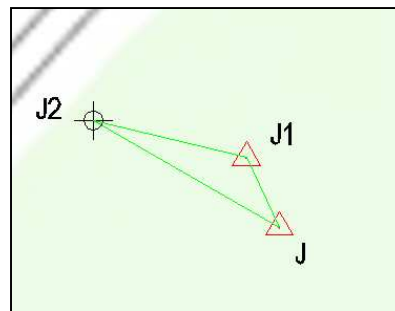
- **Poligonal 6:** Formada por los vértices J y J1 y una base adicional J2.

Cierre angular.

ec =	-0,0599	g
Correc. tramo =	-0,0200	g
T =	0,0701	g

Cierre en coordenadas.

	X (m)	Y (m)	H (m)
ec =	0,006	-0,001	-0,021
E _{total} =	0,0064	ea _{promedio} =	286,1682
E _{longitudinal} =	0,0488	E _{transversal} =	0,0018
Tolerancia=		0,0488	g



Como se puede observar en cada una de las poligonales los valores son inferiores a la tolerancia obtenida para cada caso. Por ello podremos proseguir con la compensación por mínimos cuadrados para obtener el error en cada coordenada aproximada y su error asociado.

4.2. Cálculo y compensación de las poligonales.

Ahora queremos obtener las coordenadas compensadas de cada una de las bases que componen el itinerario a partir de las aproximadas calculadas anteriormente. Para ello usamos el método de los mínimos cuadrados por ser una forma efectiva, rápida y

comprobable. Este método se utilizará tanto para planimetría como altimetría donde esta última también emplearemos la compensación por métodos clásicos.

4.2.1. Planimetría.

En este apartado calcularemos las correcciones a las coordenadas aproximadas mediante una compensación por mínimos cuadrados. De las seis poligonales expuestas en el apartado anterior nueve puntos son bases y 12 son vértices de los cuales sabemos sus coordenadas y se tratarán de puntos fijos.

El método de mínimos cuadrados consta de una relación matemática definida a partir de matrices.

$$A \cdot x = U \quad (10)$$

$$A^T P A x = A^T P U \quad (11)$$

$$x = (A^T P A)^{-1} (A^T P U) \quad (12)$$

Donde la matriz diseño, también llamada matriz A, es una matriz que en nuestro caso se ha realizado por ángulos existiendo también la posibilidad de hacerlo por acimuts, se ha elegido por ángulos puesto que el tamaño de la matriz es menor que a la de acimuts. Por consiguiente la expresión general de la forma lineal de observación por ángulos será:

$$a_{i-1} \cdot \delta x_{i-1} + a_i \cdot \delta x_i + a_{i+1} \cdot \delta x_{i+1} + b_{i-1} \cdot \delta y_{i-1} + b_i \cdot \delta y_i + b_{i+1} \cdot \delta y_{i+1} = \alpha_0 - \alpha_{ca} + R_\alpha = U + R_\alpha \quad (13)$$

$$a_{i-1} = \frac{y_i - y_{i-1}}{l_{(i-1)i}^2} \quad a_i = - \left[\frac{y_{i+1} - y_i}{l_{i(i+1)}^2} + \frac{y_i - y_{i-1}}{l_{(i-1)i}^2} \right] \quad a_{i+1} = \frac{y_{i+1} - y_i}{l_{i(i+1)}^2} \quad (14)$$

$$b_{i-1} = - \frac{x_i - x_{i-1}}{l_{(i-1)i}^2} \quad b_i = \left[\frac{x_{i+1} - x_i}{l_{i(i+1)}^2} + \frac{x_i - x_{i-1}}{l_{(i-1)i}^2} \right] \quad b_{i+1} = - \frac{x_{i+1} - x_i}{l_{i(i+1)}^2} \quad (15)$$

Mientras que las ecuaciones de distancia serán:

$$\delta l_{ca} = \delta l_{ij} = \delta y_j \cos \theta_{ica}^j - \delta y_i \cos \theta_{ica}^j + \delta x_j \sin \theta_{ica}^j - \delta x_i \sin \theta_{ica}^j = l_0 - l_{ca} + r_l \quad (16)$$

A lo que se refiere la matriz Pesos, se tratará de una matriz cuadrada y diagonal para cada uno de los casos, ésta es la que ponderará los errores de las observaciones. Y le dará diferente importancia a las observaciones de ángulo y a las de distancia.

$$\text{Para observaciones angulares: } P = \frac{1}{e\alpha^2} \quad (17)$$

$$\text{Para observaciones de distancia: } P = \frac{1}{ed^2} \quad (18)$$

Se ha decidido tomar para el cálculo de los pesos como referencia angular el error angular al cuadrado para cada tramo porque las medidas han sido tomadas con estación total, y para las distancias el error distanciométrico al cuadrado para ponderar cada una de las distancias dando un valor mayor a las mayores.

Y por último la matriz de términos independientes (U), está formada por la diferencia angular entre la observada y la calculada que hay en la estación que estamos situados, para el cálculo de esta diferencia obtenemos el observado por diferencia de lecturas al punto siguiente y anterior y el calculado por diferencia de acimuts calculados entre la estación y la base posterior y anterior. El valor resultante lo multiplicamos por 10000 para pasarlo a segundos centesimales. En cuanto a las distancias se hace igualmente la diferencia entre observado y calculado dejándolo en metros.

Una vez montadas las tres matrices se empieza a operar con ellas en Excel para encontrar el vector X de correcciones de las incógnitas (coordenadas desconocidas) cuyas unidades son metros, para ello realizamos la siguiente operación:

$$x = (A^T P A)^{-1} (A^T P U) \quad (19)$$

Para comprobar la calidad de estas correcciones y por tanto las coordenadas corregidas se calcula el vector de residuos (R) para cada poligonal. Éste nos indica si los resultados han salido como se esperaba en un principio o por lo contrario son demasiado dispares. De esta manera si los residuos son grandes querrá decir que la primera aproximación no ha sido del todo buena y habrá que comprobar que no hay ningún error. Las unidades de este vector son de segundos centesimales para las observaciones angulares y de metros para las de distancias.

$$R = A \cdot x - U \quad (20)$$

Por último se halla la desviación típica (σ_0). Es un parámetro adimensional que se calcula para saber la bondad del ajuste completa. Debe ser lo más cercano a uno porque la varianza de referencia fijada previamente para el cálculo de la matriz de pesos, a la que se le ha asignado ese valor, si es así nos dice que los errores estimados a priori son correctos en la observación.

$$\sigma_0 = \sqrt{\frac{R^T P R}{gll}} \quad (21)$$

- Poligonal 1.

δx_{A1}	-0,015	m
δy_{A1}	-0,006	m
δx_{B1}	0,004	m
δy_{B1}	-0,012	m

Residuos

B_A_A1	61,6295	cc
A_A1_B1	9,6025	cc
A1_B1_B	40,3780	cc
B1_B_A	-12,6100	cc
A_A1	0,001	m
A1_B1	-0,002	m
B1_B	-0,001	m

$\sigma_0 =$	1,2830	Desviación típica
$\sigma_0^2 =$	1,6461	Varianza

- Poligonal 2.

δx_{C1}	-0,004	m
δy_{C1}	0,000	m
δx_{C2}	-0,010	m
δy_{C2}	0,001	m
δx_{C3}	-0,015	m
δy_{C3}	-0,002	m

Residuos

C_D_C1	-33,0721	cc
D_C1_C2	77,1702	cc
C1_C2_C3	-57,3598	cc
C2_C3_C	-85,2569	cc
C3_C_D	7,0185	cc
D_C1	-0,002	m
C1_C2	0,000	m
C2_C3	0,006	m
C3_C	0,006	m

$\sigma_0 =$	2,4163	Desviación típica
$\sigma_0^2 =$	5,8387	Varianza

- Poligonal 3.

δx_{F2}	0,001	m
δy_{F2}	-0,013	m

Residuos

F_F1_F2	-110,4417	cc
F1_F2_F	-440,8878	cc
F2_F_F1	405,4630	cc
F1_F2	0,013	m
F2_F	-0,002	m

$\sigma_0 =$	3,4056	Desviación típica
$\sigma_0^2 =$	11,5978	Varianza

- Poligonal 4.

δx_{G2}	-0,005	m
δy_{G2}	0,000	m

Residuos		
G_G1_G2	31,7690	cc
G1_G2_G	421,0324	cc
G2_G_G1	3,3566	cc
G1_G2	0,005	m
G2_G	-0,003	m

$\sigma_0 =$	1,2196
$\sigma^2 =$	1,4875

Desviación típica

Varianza

- Poligonal 5.

δx_{H2}	-0,004	m
δy_{H2}	0,004	m

Residuos		
H_H1_H2	97,3492	cc
H1_H2_H	-12,1949	cc
H2_H_H1	312,7876	cc
H1_H2	0,006	m
H2_H	-0,002	m

$\sigma_0 =$	1,4127
$\sigma^2 =$	1,9957

Desviación típica

Varianza

- Poligonal 6.

δx_{J2}	-0,003	m
δy_{J2}	0,003	m

Residuos		
J_J1_J2	137,6962	cc
J1_J2_J	222,0684	cc
J2_J_J1	-14,1307	cc
J1_J2	0,004	m
J2_J	-0,002	m

$\sigma_0 =$	1,3800
$\sigma^2 =$	1,9045

Desviación típica

Varianza

Los valores obtenidos en las desviaciones típicas son todas superiores a uno, es decir superiores a los valores esperados en un principio. Esto significa que los pesos deberían ser más grandes y por tanto los errores más pequeños para que los resultados den como se esperaba en un principio. Al ser la desviación típica ligeramente mayor en todos los cálculos de las poligonales nos indica que los errores que se obtienen al principio son más grandes de los esperados, es decir que deberían ser algo más pequeños. Se saca la conclusión de que al principio se ha sido poco optimista en cuanto a los errores resultantes.

Para conocer los errores asociados y las elipses de error se utiliza la matriz varianza covarianza que es el resultado de multiplicar la desviación típica al cuadrado por la matriz cofactor $((A^T \cdot P \cdot A)^{-1})$. La raíz de los términos de su diagonal nos indican los errores asociados de cada incógnita (coordenadas) del sistema creado.

$$Qu = \sigma_0^2 \cdot (A^T \cdot P \cdot A)^{-1} \quad (22)$$

Una vez comprobado que los resultados salen como se esperaba en un principio se procede a compensar las coordenadas aproximadas sumándoles la corrección correspondiente obtenida en la matriz X. Además se obtienen los errores asociados a cada una de ellas con la matriz varianza covarianza.

Para saber la fiabilidad y la precisión de los ajustes mínimo cuadráticos se hace el test estadístico de la t-student con la fiabilidad de 68% y del 95%. La primera de ellas es la raíz de la diagonal de la matriz varianza covarianza, es decir los errores asociados en cambio para la segunda hay que acudir a la tabla de la t-student y consultar con los grados de libertad de cada poligonal, observaciones menos incógnitas, el correspondiente valor al 0,05, 100% - 95%.

Para cada una de las poligonales se ha observado que tienen los mismos grados de libertad (ecuaciones – incógnitas) y por tanto el mismo valor t-student para el 95% encontrado en la tabla, siendo este:

Grados de libertad	3
Valor al 95%	2,3534

Tabla 18. Valores T-Student.

Test estadísticos

Base	t-student 68%		t-student 95%	
	X (m)	Y (m)	X (m)	Y (m)
A1	0,008	0,004	0,018	0,010
B1	0,004	0,005	0,010	0,012
C1	0,009	0,008	0,021	0,020
C2	0,008	0,010	0,020	0,024
C3	0,009	0,008	0,021	0,018
F2	0,008	0,008	0,020	0,020
G2	0,002	0,002	0,006	0,005
H2	0,003	0,003	0,007	0,007
J2	0,004	0,004	0,008	0,008

Tabla 19. Resultados de fiabilidad de coordenadas con estadística T-Student.

Una vez se comprueba la fiabilidad con el t-student de las coordenadas pasamos al cálculo de los semiejes de la elipse de error con las mismas fiabilidades que en el caso anterior. Las fórmulas para el cálculo de los semiejes son las siguientes:

$$a^2 = \frac{1}{2} [\sigma_x^2 + \sigma_y^2 + \sqrt{(\sigma_x^2 - \sigma_y^2)^2 + 4\sigma_{xy}^2}] \quad (23)$$

$$b^2 = \frac{1}{2} [\sigma_x^2 + \sigma_y^2 - \sqrt{(\sigma_x^2 - \sigma_y^2)^2 + 4\sigma_{xy}^2}] \quad (24)$$

$$tg2w = \frac{2\sigma_{xy}}{\sigma_y^2 - \sigma_x^2} \quad (25)$$

Siendo los valores:

Elipse de error

	Fiabilidad del 68%			Fiabilidad del 95%		
	a (m)	b (m)	ω (m)	a (m)	b (m)	ω (m)
A1	0,008	0,004	-0,160	0,018	0,010	-0,375
B1	0,005	0,004	0,224	0,013	0,009	0,528
C1	0,010	0,008	0,647	0,023	0,018	1,522
C2	0,011	0,007	0,553	0,026	0,017	1,300
C3	0,009	0,007	-0,457	0,021	0,017	-1,076
F2	0,010	0,007	0,774	0,023	0,016	1,822
G2	0,003	0,002	0,695	0,007	0,004	1,636
H2	0,003	0,003	0,313	0,008	0,007	0,737

Tabla 20. Valores de fiabilidad de la elipse de error para el 68% y el 95%.

Tanto con la evaluación de la t-student en coordenadas como con la elipse de error se evalúa la fiabilidad de la posición de las bases de la poligonal. Con el 68% de fiabilidad obtenemos unos valores por mínimos cuadrados del intervalo positivo y negativo donde podemos encontrar la posición del punto, para tener más certeza aumentamos ese intervalo al 95% para que haya más posibilidades de que se encuentre en su lugar. La ventaja de aumentar la incertidumbre de su situación es que la probabilidad de encontrarlo en ese intervalo es casi total. Aplicándolo a las coordenadas tenemos una incertidumbre en X e Y y haciendo la elipse de error delimitamos una zona indicando los semiejes de la misma y el posible giro que puede tener esta región.

4.2.2. Altimetría.

La nivelación trigonométrica se puede efectuar de dos maneras, por métodos clásicos o por mínimos cuadrados. Empezamos con los primeros y a continuación se expondrá por mínimos cuadrados para poder comparar.

- **Métodos clásicos.**

Existen cuatro métodos de compensación clásica en la nivelación trigonométrica:

Por igual a todos los tramos.

Consiste en repartir el error de cierre de cada anillo entre los tramos que los componen y sumar o restar ese valor a cada uno de ellos por igual. Este método es sencillo y se usa sobre todo cuando los tramos son bastante semejantes y de dimensiones reducidas.

ec1 =	0,008	mm
ec2 =	-0,001	mm
ec3 =	0,013	mm
ec4 =	0,009	mm
ec5 =	-0,058	mm
ec6 =	-0,021	mm

Tabla 21. Errores de cierre en cota de cada poligonal.

	Por igual a todos los tramos			
	Valor a compensar	Δz corregido	Estación	Z corregida
A_A1	0,0027	-8,756	A	163,759
A1_B1	0,0027	7,520	A1	155,002
B1_B	0,0027	-0,855	B1	162,522
			B	161,666
D_C1	-0,0004	2,306	C	177,315
C1_C2	-0,0004	-6,473	D	177,412
C2_C3	-0,0004	-3,172	C1	179,717
C3_C	-0,0004	7,243	C2	173,244
	0,0000	0,000	C3	170,072
F1_F2	0,0066	0,959	F	180,129
F2_F	0,0066	-1,038	F1	180,208
	0,0000	0,000	F2	181,167
G1_G2	0,0043	-1,268	G	219,967
G2_G	0,0043	0,896	G1	220,339
	0,0000	0,000	G2	219,071
H1_H2	-0,0290	-0,441	H	277,837
H2_H	-0,0290	0,752	H1	277,526
	0,0000	0,000	H2	277,085
J1_J2	-0,0105	1,515	J	309,758
J2_J	-0,0105	-2,499	J1	310,742
	0,0000	0,000	J2	312,257

Tabla 22. Compensación de cota por igual a todos los tramos.

Proporcional a las distancias parciales.

Como el propio método indica, se compensa en función de las distancias entre los tramos, para ello se utilizan las distancias UTM halladas anteriormente. Es una buena forma de compensar si las distancias de los tramos son muy dispares entre ellas.

$$C = \frac{e_c}{D_i} \cdot D_i \quad (26)$$

	Proporcional a las distancias parciales			
	Valor a compensar	Δz corregido	Estación	Z corregida
A_A1	0,0025	-8,756	A	163,759
A1_B1	0,0028	7,519	A1	155,002
B1_B	0,0028	-0,855	B1	162,522
			B	161,666
D_C1	-0,0003	2,306	C	177,315

C1_C2	-0,0003	-6,473	D	177,412
C2_C3	-0,0003	-3,173	C1	179,717
C3_C	-0,0005	7,243	C2	173,244
			C3	170,072
F1_F2	0,0061	0,959	F	180,129
F2_F	0,0071	-1,038	F1	180,208
			F2	181,168
G1_G2	0,0061	-1,269	G	219,967
G2_G	0,0024	0,897	G1	220,339
			G2	219,070
H1_H2	-0,0321	-0,438	H	277,837
H2_H	-0,0258	0,749	H1	277,526
			H2	277,088
J1_J2	-0,0089	1,514	J	309,758
J2_J	-0,0121	-2,498	J1	310,742
			J2	312,256

Tabla 23. Compensación de cota proporcional a las distancias parciales.

Proporcional a los desniveles parciales.

Este método es bueno porque se aplica una mayor corrección a aquellos desniveles que son mayores y por tanto los que son más propensos a tener algún tipo de error, para ello es necesario obtener una corrección por tramo. Además hay que tener en cuenta el signo que tiene el desnivel y como aplicarle la corrección.

$$C = \frac{e_c}{\sum |\Delta z_i|} \cdot \Delta z_i \quad (27)$$

$\Sigma \Delta z1 =$	17,129	m
$\Sigma \Delta z2 =$	19,194	m
$\Sigma \Delta z3 =$	1,997	m
$\Sigma \Delta z4 =$	2,163	m
$\Sigma \Delta z5 =$	1,193	m
$\Sigma \Delta z6 =$	4,014	m

Tabla 24. Sumatorio de desniveles parciales.

Proporcional a los desniveles parciales				
	Valor a compensar	Δz corregido	Estación	Z corregida
A_A1	0,0042	-8,758	A	163,759
A1_B1	0,0036	7,519	A1	155,001
B1_B	0,0004	-0,853	B1	162,519
			B	161,666
D_C1	-0,0002	2,305	C	177,315
C1_C2	-0,0005	-6,473	D	177,412
C2_C3	-0,0002	-3,173	C1	179,717

C3_C	-0,0005	7,243	C2	173,244
			C3	170,072
F1_F2	0,0064	0,959	F	180,129
F2_F	0,0068	-1,038	F1	180,208
			F2	181,167
G1_G2	0,0050	-1,268	G	219,967
G2_G	0,0036	0,896	G1	220,339
			G2	219,071
H1_H2	-0,0228	-0,447	H	277,837
H2_H	-0,0351	0,758	H1	277,526
	0,0000	0,000	H2	277,079
J1_J2	-0,0079	1,513	J	309,758
J2_J	-0,0131	-2,497	J1	310,742
			J2	312,255

Tabla 25. Compensación de cota proporcional a los desniveles parciales.

Proporcional a los desniveles directo y recíproco.

Es el método más complejo por lo que hace el cálculo de la corrección, pero también es el más completo. Se trata de la influencia de distancias y pendientes conjuntamente. Para llevar a cabo la compensación se suman las discrepancias entre los desniveles recíprocos.

$$Z_{comp.} = Z_{prom.} \pm (Z_{dir.} + Z_{rec.}) \cdot \frac{e_c}{\Sigma(\Delta Z_{dir.}) + \Sigma(\Delta Z_{rec.})} \quad (28)$$

Prop. a desniveles directo y recíproco			
	Δz corregido	Estación	Z corregida
A_A1	-8,778	A	163,759
A1_B1	7,502	A1	154,981
B1_B	-0,817	B1	162,483
		B	161,666
D_C1	2,306	C	177,315
C1_C2	-6,472	D	177,412
C2_C3	-3,173	C1	179,717
C3_C	7,243	C2	173,246
		C3	170,072
F1_F2	0,961	F	180,129
F2_F	-1,040	F1	180,208
		F2	181,169
G1_G2	-1,243	G	219,967
G2_G	0,871	G1	220,339

		G2	219,096
H1_H2	-0,439	H	277,837
H2_H	0,750	H1	277,526
	0,000	H2	277,087
J1_J2	1,524	J	309,758
J2_J	-2,508	J1	310,742
		J2	312,266

Tabla 26. Compensación de cota proporcional a desniveles directo y recíproco.

- Compensación mínimo cuadrática.

Una vez calculados los desniveles parciales a través de la fórmula ya conocida $\Delta Z = t+i-m$ se procede al cálculo del error máximo en cada desnivel (e_z), siendo este la composición cuadrática del error en distancia (e_{TD}), en el ángulo vertical (e_{TV}), el error por falta en la verticalidad del prisma (e_m) y el error en la altura del aparato (e_i), este último se estima en un máximo de 1 cm y se adopta este valor por defecto.

$$e_z = \sqrt{e_{TD}^2 + e_{TV}^2 + e_m^2 + e_i^2} \quad (29)$$

$$\text{Dónde: } e_{TD} = (D + e_d) \cdot \text{ctg}V - D \cdot \text{ctg}V$$

$$e_{TV} = D \cdot \text{ctg}(E + e_a) - D \cdot \text{ctg}V \quad \rightarrow \quad e_d = \sqrt{e_s^2 + e_e^2 + a^2 + (b \cdot D)^2} \quad (30)$$

$$e_{Tm} = m(1 - \cos\beta)$$

Hay que tener en cuenta que el error angular en este aparato es diferente, este lo componen los siguientes errores:

ev =	133,3333	cc
ep =	8,0374	cc
el =	7,0711	cc
ea =	133,7624	cc

Tabla 27. Errores del aparato.

Una vez calculado el error máximo se comprueba que entran en tolerancia, para ello la calculamos de la siguiente manera:

$$T = e_{z_{prom}} \cdot \sqrt{2} \quad (31)$$

Estación	Pto. Visado	ez prom.	Tolerancia	Dif. de desniveles
A	A1	25,409	0,036	0,007
A1	B1	27,702	0,039	0,006
B1	B	27,825	0,039	-0,010
B	A	40,577	0,057	-0,008
C	D	22,966	0,032	-0,001
D	C1	12,230	0,017	0,002
C1	C2	13,898	0,020	0,013
C2	C3	13,371	0,019	-0,003
C3	C	18,498	0,026	0,005
F	F1	7,256	0,010	0,004
F1	F2	7,382	0,010	0,003
F2	F	7,487	0,011	0,006
G	G1	7,205	0,010	0,000
G1	G2	7,321	0,010	0,004
G2	G	7,128	0,010	-0,005
H	H1	7,227	0,010	0,004
H1	H2	7,330	0,010	0,003
H2	H	7,243	0,010	0,003
J	J1	7,144	0,010	0,002
J1	J2	7,321	0,010	0,006
J2	J	7,532	0,011	0,000

Tabla 28. Errores y tolerancias de las cotas por tramos.

Cuando ya se comprueba que todos los tramos entran en tolerancia se procede a hacer el promedio de los desniveles parciales, siempre teniendo en cuenta el signo y quedándonos con el directo. Ahora se puede empezar a realizar el ajuste mínimo cuadrático.

Las matrices de diseño (A) están compuestas por ceros y unos, los unos están situados de manera que cada observación (desnivel entre bases) contenga la resta entre cota siguiente y la de estacionamiento. En este caso se dispone de 15 observaciones divididas entre seis poligonales distintas y de 9 incógnitas, una cota para cada base.

La matriz de pesos (P) es la que se utiliza para dar diferente importancia a las observaciones y consiste en una matriz diagonal con el resto ceros formada por la siguiente ecuación:

$$P = \frac{2}{ez_{prom.}^2} \quad (32)$$

La matriz de términos independientes (U) está formada únicamente por el promedio entre los promedios entre los desniveles directo y recíproco de cada observación, exceptuando las observaciones que intervienen uno de los puntos de cota conocida en los que restaremos o sumaremos su cota según estemos estacionados en él o lo visemos. Las unidades de estos desniveles son metros.

Seguidamente se consigue la matriz resultado (X) que se obtiene de operar las matrices anteriores, con la ecuación conocida $X = (A^T \cdot P \cdot A)^{-1} (A^T \cdot P \cdot U)$ donde encontraremos como resultado directamente las cotas ortométricas de cada una de las bases.

El vector residuos (V) nos informará de la fiabilidad del ajuste mínimo cuadrático, si los residuos son grandes querrá decir que la primera aproximación no ha salido como se esperaba y habrá que comprobar que no haya ningún error. Las magnitudes de este vector son de metro.

$$R = A \cdot X - U \quad (33)$$

	Residuos
A_A1	-0,0024
A1_B1	-0,0029
B1_B	-0,0029
D_C1	0,0003
C1_C2	0,0003
C2_C3	0,0003
C3_C	0,0006
F1_F2	-0,0065
F2_F	-0,0067
G1_G2	-0,0044
G2_G	-0,0042
H1_H2	0,0293
H2_H	0,0286
J1_J2	0,0102
J2_J	0,0108

Tabla 29. Residuos del ajuste altimétrico.

Como se puede observar en los resultados de los residuos de cada una de las poligonales, el conjunto de ellos es bastante bueno excepto en las dos últimas poligonales donde los residuos superan el centímetro. Esto nos indica que la primera aproximación es bastante buena porque son inferiores a los errores (e_{zprom}) iniciales que se colocan en la matriz pesos.

El parámetro estadístico de la desviación típica (σ_0) nos indica la bondad del ajuste completo. Debe ser lo más cercano a uno por la misma razón que en el ajuste planimétrico, si es así nos dice que los errores estimados a priori son correctos en la observación.

$$\sigma = \sqrt{\frac{R^T P R}{gll}} \quad (34)$$

	Desviación típica σ_0	Varianza σ_0^2
pol 1	0,174	0,030
pol 2	0,049	0,002
pol 3	1,249	1,560
pol 4	0,836	0,699
pol 5	5,622	31,612
pol 6	2,001	4,004

Tabla 30. Desviaciones típicas y varianzas de las poligonales.

Por la misma razón explicada en el ajuste de coordenadas planimétricas si los resultados de la desviación típica son superiores al valor definido inicialmente, se propone una magnitud de uno, quiere decir que en un principio se ha sido poco optimista con los resultados, como pasa en las poligonales 3, 5 y 6. Por otro lado si son inferiores como ocurre en la 1, 2 y 4 significa que se es demasiado optimista con los resultados que se van a obtener.

La matriz varianza covarianza es el resultado de multiplicar la desviación típica al cuadrado por la matriz cofactor. La raíz de los términos de su diagonal nos indican los errores asociados a cada incógnita del sistema creado, en este caso las cotas ortométricas.

$$Qu = \sigma_0^2 \cdot (A^T \cdot P \cdot A)^{-1} \quad (35)$$

Cotas y error asociado		
ZA	163,759	m
ZB	161,666	m
ZA1	155,002 ± 0,004	m
ZB1	162,522 ± 0,004	m
ZC	177,315	m
ZD	177,412	m
ZC1	179,717 ± 0,001	m
ZC2	173,244 ± 0,001	m
ZC3	170,072 ± 0,001	m
ZF	180,129	m

ZF1	180,208	m
ZF2	181,167 ± 0,007	m
ZG	219,967	m
ZG1	220,339	m
ZG2	219,071 ± 0,004	m
ZH	277,837	m
ZH1	277,526	m
ZH2	277,086 ± 0,029	m
ZJ	309,758	m
ZJ1	310,742	m
ZJ2	312,257 ± 0,011	m

Tabla 31. Cotas y errores asociados de las bases.

Ahora se puede hacer la comprobación por el test estadístico de la t-student con una fiabilidad del 68% y otra del 95%. La primera de ellas es simplemente la raíz de la diagonal de la matriz varianza covarianza, es decir los errores asociados, en cambio para la segunda hay que acudir a la tabla de la t-student y consultar con los grados de libertad de cada poligonal con el valor de 0,05. El resultado del test estadístico de las cotas ortométricas compensadas es el siguiente:

	t-student 68%	t-student 95%
Base	Z (m)	Z (m)
A1	0,004	0,023
B1	0,004	0,025
C1	0,001	0,003
C2	0,001	0,004
C3	0,001	0,004
F2	0,007	0,041
G2	0,004	0,027
H2	0,029	0,183
J2	0,011	0,066

Tabla 32. Resultados de fiabilidad de cotas con estadística T-Student.

El test t-student nos indica cuanta es la incertidumbre de los resultados de cada una de las cotas obtenidas tanto en un 68% como en un 95%. Aumentamos al 95% para que haya más probabilidad de que esté situado en el rango obtenido aunque descienda la precisión.

Comparación entre mínimos cuadrados y método clásicos

	M.M.C.C	Métodos clásicos			
	Z	Por igual a todos los tramos	Prop. a las distancias parciales	Prop. a los desniveles parciales	Prop. a los desniveles directos y recíproco
ZA	163,759	163,759	163,759	163,759	163,759
ZA1	155,002	155,002	155,002	155,001	154,981
ZB1	162,522	162,522	162,522	162,519	162,483
ZB	161,666	161,666	161,666	161,666	161,666
ZC	177,315	177,315	177,315	177,315	177,315
ZD	177,412	177,315	177,315	177,315	177,315
ZC1	179,717	179,717	179,717	179,717	179,717
ZC2	173,244	173,244	173,244	173,244	173,246
ZC3	170,072	170,072	170,072	170,072	170,072
ZF	180,129	180,129	180,129	180,129	180,129
ZF1	180,208	180,208	180,208	180,208	180,208
ZF2	181,167	181,167	181,168	181,167	181,169
ZG	219,967	219,967	219,967	219,967	219,967
ZG1	220,339	220,339	220,339	220,339	220,339
ZG2	219,071	219,071	219,070	219,071	219,096
ZH	277,837	277,837	277,837	277,837	277,837
ZH1	277,526	277,526	277,526	277,526	277,526
ZH2	277,086	277,085	277,088	277,079	277,087
ZJ	309,758	309,758	309,758	309,758	309,758
ZJ1	310,742	310,742	310,742	310,742	310,742
ZJ2	312,257	312,257	312,256	312,255	312,266

Tabla 33. Comparación de las cotas por distintos métodos de cálculo.

Se puede observar que en las comparaciones de los diferentes métodos de cálculo para la obtención de las cotas de forma precisa, se consigue que en los puntos fijos no varíe el valor de la cota mientras que en los demás se puede concluir que existe una variación milimétrica puesto que se tratan de puntos compensados.

4.2.3. Coordenadas finales.

Finalmente se consiguen las siguientes coordenadas:

	Coordenadas finales		
	X (m)	Y (m)	Z (m)
B	493581,172	4635718,800	161,666
A	493312,275	4635715,584	163,759
A1	493359,647	4635558,796	155,002
B1	493400,681	4635734,018	162,522
C	493932,348	4635847,423	177,315
D	494071,358	4635799,431	177,412
C1	494102,340	4635858,932	179,717
C2	494086,282	4635780,559	173,244
C3	494011,688	4635764,742	170,072
F	494315,389	4635946,708	180,129
F1	494325,915	4635949,684	180,208
F2	494327,513	4635935,615	181,167
G	494553,553	4635839,872	219,967
G1	494562,195	4635843,275	220,339
G2	494549,647	4635842,953	219,071
H	495063,381	4636726,843	277,837
H1	495065,183	4636716,988	277,526
H2	495053,718	4636722,998	277,086
J	495408,402	4637159,679	309,758
J1	495405,815	4637165,219	310,742
J2	495393,717	4637168,158	312,257

Tabla 34. Coordenadas finales de las bases de las poligonales.

	Coordenadas instrumentos hidrológicos		
	X _{UTM} (m)	Y _{UTM} (m)	Z(m)
Pluviómetro Capçalera	495408,357	4637162,959	310,159
Pluviómetro Cantallops	495060,728	4636724,845	277,095
Pluviómetro Can Bóta	494550,478	4635837,867	219,314
Pluviómetro Campàs	493453,749	4635715,972	160,015
Totalizador	493927,932	4635843,283	176,691
Pozo 1	494116,906	4635881,876	184,728
Pozo 2	494155,209	4635851,686	176,039
Pozo 3	494137,380	4635807,979	173,930
Estación meteorológica	493937,149	4635843,802	177,284
Estación aforo Campàs	493361,298	4635556,668	152,961
Estación aforo Bosc	494312,816	4635944,593	178,073

Tabla 35. Coordenadas finales de los instrumentos hidrológicos.

Gracias al ajuste preciso obtenido por el método de cálculo de mínimos cuadrados se han conseguido estas coordenadas de las bases de las poligonales con las que realizar el cálculo de los puntos radiados. Para las cotas se ha decidido desechar las obtenidas por método clásicos puesto que se cree que ha habido más precisión en el cálculo y se han

tenido en cuenta todos los posibles errores accidentales de la toma de datos y no únicamente el error de cierre y las distancias.

4.3. Seguimiento del perfil de erosión.

Las dos subcuencas forman un comportamiento hidrológico similar, aunque los caudales máximos fueron menores en la estación de *Bosc* dada su menor superficie. La escorrentía fue en tres casos mayor en la cuenca forestal, pero en esta estación el volumen total de escorrentía de cualquier crecida es menor que en la estación de *Campàs*. Estas crecidas aportan el 80% del volumen total de agua que circula por la cuenca durante el año, si bien representan sólo un 20% del tiempo de escorrentía. Se trata por tanto de una cuenca típicamente torrencial, es decir que funciona solamente cuando se producen fuertes lluvias y el acuífero ha tenido tiempo de recargarse de la sequía estival.

En una zona determinada de la cuenca, minuciosamente elegida por el director del proyecto de la UB, en las proximidades de la estación meteorológica, se realizó un perfil longitudinal de 72 metros con el objetivo de estudiar la erosión o sedimentación producida en un periodo de tiempo determinado en el que se sabe que se han producido lluvias. Los periodos elegidos para la observación de dicho perfil fueron una primera campaña en el mes de Octubre de 2010 y una segunda campaña en el mes Mayo de 2011.

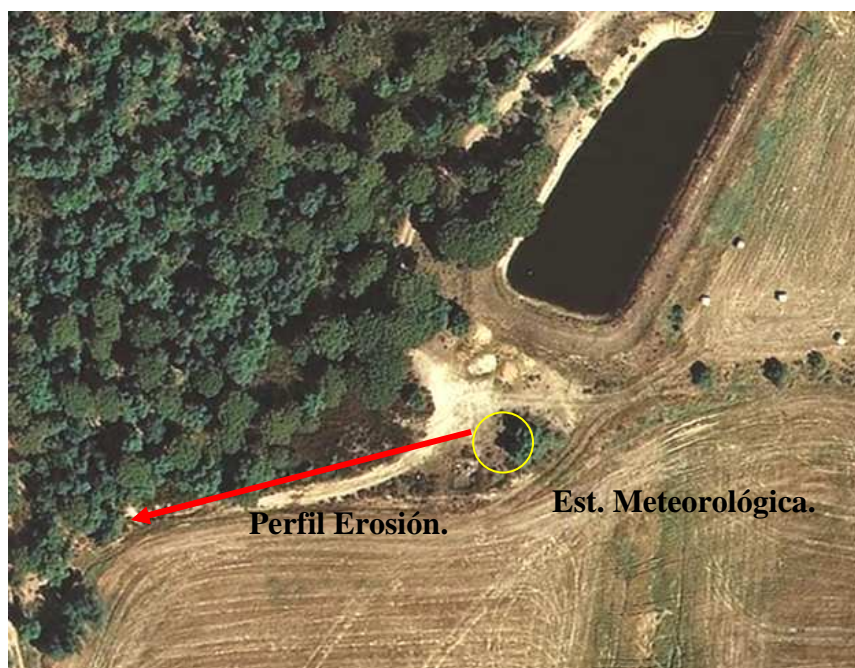


Imagen 7. Emplazamiento del perfil de erosión.

En la zona se encuentran pendientes negativas y positivas de forma que puede funcionar a modo de trampa de sedimentación. Además lo atraviesa una pequeña riera donde en época de lluvias circula suficiente agua como para arrastrar sedimentos y depositarlos más adelante. (Véase anejos página 63 Planos).

No solo se toman datos en el propio perfil, sino que además se realizan puntos “de relleno” alrededor para calcular dos superficies de las diferentes campañas de observación y así poder confeccionar un mapa de diferencia de cotas de la zona y tener un estudio más amplio. Mediante estas superficies y el perfil longitudinal creado, se puede llegar a la conclusión que ha habido más sedimentación que erosión, esto puede ser causado debido a que el perfil se encuentra en la zona baja de la cuenca y todas las partículas erosionadas se sedimentan allí. Además comparando con otros estudios de erosión en otra zona cercana, se observa que este año ha habido menos precipitación y por tanto menos erosión y sedimentación. Estas diferencias se han podido ver mediante la creación de un mapa de isopacas en el cual se puede ver la diferencia de superficies. (Véase anejos página 63 Planos).

Las condiciones de humedad del suelo antes de las crecidas son el factor que determina la escorrentía total, el volumen total generado, el coeficiente de escorrentía y el caudal máximo.

5. Mapas temáticos.

Además de la red geodésica, los levantamientos topográficos y el seguimiento de un perfil de erosión, se planteó hacer además una serie de mapas temáticos de la zona de investigación. Éstos pueden ser de gran ayuda para todos los proyectos que se están cursando en torno la cuenca hidrográfica del *Vernegà*.

A partir de mapas descargados desde la aplicación del ICC se han producido mapas de pendientes en tanto por ciento, de orientación de pendientes y un mapa de elevación por coropletas. (Véase anejos página 63 Planos).

En el mapa temático de orientación de pendientes se puede concluir, que existen más pendientes orientadas entre el sureste y el oeste, es decir hay más vertientes cálidas y sombrías. Este mapa en concreto puede servir para el estudio de las erosiones de la cuenca según la vertiente o también el desarrollo de la flora y fauna de la zona según se encuentren en las vertientes de sol o sombra.

En cuanto al mapa de pendientes en tanto por ciento se puede decir, que la mayoría de pendientes que forman la cuenca son menores al 28%. Esto puede concretar las zonas donde existe más erosión según las pendientes, ya que en teoría a más pendiente más velocidad del agua y por tanto más fuerza para arrastrar sedimentos; aunque esto también dependa del tipo de vegetación de la zona.

Por último, el mapa de elevaciones por coropletas se muestra las elevaciones del terreno según la zona; utilizables para conocer la cota aproximada de alguna zona donde se quieran realizar estudios u observaciones de cualquier tipo.

6. Conclusión.

El principal objetivo de este trabajo era realizar la georreferenciación de la instrumentación hidrológica que utiliza la *Universitat de Barcelona* para los estudios e investigaciones. Ahora la cuenca está plenamente instrumentada desde el punto de vista geomático y geométrico gracias a los hitos con coordenadas precisas y así se han cumplido los objetivos inicialmente marcados. Este método también se puede realizar para cuencas de mayor extensión.

Gracias a la instauración de la red geodésica se podrán hacer distintos estudios en un futuro referentes a la localización de elementos del terreno así como cambios en las estructuras existentes, ya que se facilitan las geometrías de las mismas.

Se puede concluir que para la georreferenciación de una zona de grandes extensiones y con estación de referencia de coordenadas conocidas situada en una zona urbana alejada, el método idóneo de trabajo son los receptores GNSS, y la estación total para hacer levantamientos de alta precisión. A pesar que en nuestra red geodésica han existido algunos problemas debido a la gran forestación del lugar y al ramaje causado por la nevada de Marzo del 2010.

Los resultados de la red geodésica se han escogido de los diferentes cálculos en post-proceso realizados con los programas Leica Geo Office y Topcon Tools, y a su vez con señales de la constelación GPS y la combinación de ésta con la GLONASS. Como resultados definitivos se toman los de Topcon Tools con la combinación de ambas constelaciones puesto que del otro modo había que desechar uno de los vectores que se consideraba importante, además las diferencias entre los resultados no eran demasiado grandes, con lo que cualquiera hubieran sido correctos.

Los levantamientos topográficos realizados en las zonas donde existen aparatos hidrológicos, en un futuro se podrán utilizar para la creación de nuevas infraestructuras o para la rehabilitación de estas.

Además con la creación de un perfil de erosión se ha podido observar que en la cuenca existe cierta erosión y depósito de sedimentos en las zonas más bajas de ésta. Aunque esta temporada de lluvias ha sido seca y no se ha precipitado demasiado sedimento y por tanto se ha depositado pocos sedimentos.

La aplicación de varias ramas de la geomática, ya sea la cartografía con los mapas temáticos y la topografía con la red y los levantamientos creados, nos ha servido para ampliar conocimientos estudiados en la carrera.

7. Futuras líneas de estudio.

Gracias al proyecto creado se podrán realizar futuros trabajos de otros profesionales (Teledetección, SIG, Geografía, Geología, etc.) a partir de los datos facilitados a partir de la creación de la red geodésica en la microcuenca de *Vernegà* en Gerona. Estos pueden ser:

- Seguimiento perfil de erosión.
- Modificaciones en las zonas de estudio con implementación de nuevos instrumentos hidrológicos.
- Localización de posibles áreas empleadas para la creación de incendios controlados por parte de los GRAF (*Grup de Reforç d'Actuacions Forestals*).
- Situación de zonas de explotación del corcho.
- Estudios medioambientales como la deforestación.

8. Bibliografía.

Úbeda, X.; Reina, L.; Sala, M. Cuantificación de la erosión en un camino forestal de un bosque típico mediterráneo de *Quercus suber*. Norba. Revista de Geografía. Departamento de Geografía, Univ. de Cáceres: 185 - 196 Año: 1998

Úbeda, X.; Sala, M. Chemical concentrations in overland flow from different forested areas in a Mediterranean Environment: burned forest at different fire intensity and unpaved road. Zeitschrift für Geomorphologie. Volumen: 45: 2: 225 - 238 Año: 2001

Farguell, J; Sala, M. Exportación de agua y sedimento en dos pequeñas cuencas mediterráneas bajo diferentes usos del suelo. Sistema costero catalán. Cuaternario y Geomorfología. Vol. 16: 97 – 109. Año 2002.

Outeiro, L.; Úbeda, X.; Farguell, J. The impact of agriculture on solute and suspended sediment load on a Mediterranean watershed after intense rainstorms. Earth Surface Processes and Landforms

Volumen: 35 Número: 5: 549 - 560 Año: 2010

Úbeda, X., Outeiro, L., Farguell, J., Cortés, A. Guia de cap per a l'estudi de balanços hídrics i de sediments en una conca representativa. Textos docents de La Universitat de Barcelona. En publicació.

GeoInformatics Magazine, May 2011.

Rodríguez Jordana, Joan. Ajuste de observaciones: el método de los mínimos cuadrados con aplicaciones a la topografía. Barcelona: Edicions UPC, 2002.

Ojeda Ruiz, José Luis. Métodos topográficos y oficina técnica. Madrid: el autor, 1984. ISBN 8439809182.

Domínguez García-Tejero, Francisco. Topografía general y aplicada. 13a ed. Madrid: Mundi-Prensa, 1998. ISBN 8471147211.

Páginas web:

www.icc.es

<http://publicacions.iec.cat/repository/pdf/00000025/00000036.pdf>

<http://tierra.rediris.es/>

[http://tierra.rediris.es/CuaternarioyGeomorfologia/images/vol16/Cuaternario16\(1-4\)_10.pdf](http://tierra.rediris.es/CuaternarioyGeomorfologia/images/vol16/Cuaternario16(1-4)_10.pdf)

<http://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=109745>

<http://issuu.com/eriborri/docs/ero-sed>

<http://aca-web.gencat.cat/aca/appmanager/aca/aca/>

http://www.ngs.noaa.gov/cgi-bin/query_cal_antennas.pr?Model=TPS&Antenna=TPSHIPER_PLUS

<http://hidrografica.tripod.com/geomatica.htm>

<http://www.escobarinstrumentos.com/pdfs/manuales%20articulos/topcon%20Manual%20Software%20TopconTools%20Postproceso%20es.pdf>

<http://www.glonass-center.ru/en/>

<http://www.icsuro.com/>

9. Agradecimientos.

A nuestros tutores Carlos Gracia y Francesc Pros por lo que nos han ayudado durante el trabajo.

Al departamento de Geografía Física de la Universidad de Barcelona y en especial a Xavier Úbeda, a Àlex y a Edinson por facilitarnos el trabajo en la cuenca, aportarnos información sobre la cuenca y la posibilidad de trabajar en ella.